

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE

GPA-210

Éléments de fabrication mécanique

NOTES DE COURS

Luc Trottier  
chargé de cours

Rédigé par Paul Gely  
Modifié

Hiver 1992  
Été 1999





## PREFACE

Le domaine de la construction mécanique, un des piliers du monde industriel actuel, a connu une profonde mutation depuis l'avènement de l'ère industrielle. Encore de nos jours, la production automatisée s'avère un nouveau pas dans cette mutation. Les principes de fabrication évoluent normalement tandis que le milieu environnant s'automatise, se robotise en faisant appel à l'ordinateur. Cela appelle un renouvellement des équipements, mais aussi la création de nouveaux instruments de formation. L'Ecole de Technologie Supérieure adapte son enseignement à cette nouvelle exigence en offrant une scolarité préparant le baccalauréat en technologie de la production automatisée.

Ces notes ont été rédigées précisément dans le but d'apporter aux étudiants et aux professionnels de formation électrique et électronique les données fondamentales de fabrication essentielles au lancement d'une production. Elles comprennent onze chapitres dont l'ordre de présentation sera respecté durant le cours. Après une revue des normes de cotations dimensionnelle, géométrique et d'état de surface, sont introduites deux étapes utiles à la compréhension des dessins mécaniques: l'analyse et la cotation fonctionnelle. Ensuite sont présentés et analysés les différents procédés d'obtention de pièces brutes ainsi que les procédés d'usinage. Pour chacun d'entre eux sont exposés le principe de travail, les spécificités et les diverses conditions d'utilisation. L'isostatisme et le transfert de cotes sont les dernières étapes qui permettent d'aborder en détails la rédaction d'un lancement de production appelé gamme d'usinage. Finalement le dernier chapitre présente une science graphique, la géométrie descriptive.

Ces notes sont le fruit d'une revue bibliographique et de mon expérience personnelle. Les chapitres comportent des exemples concrets résolus tandis que le recueil d'exercices séparés des présentes notes, permet à l'étudiant de vérifier et d'approfondir ses connaissances.

Bonne session.

Paul Gely



## TABLE DES MATIERES

|   |        |
|---|--------|
| Préface .....   | i      |
| Volumes de référence .....  | vi     |
| <br>I Tolérances dimensionnelles et ajustements   | <br>1  |
| 1.1 Définition d'une cote .....   | 1      |
| 1.2 Introduction et terminologie .....  | 2      |
| 1.3 Le système ISO .....  | 3      |
| 1.4 Ajustements .....   | 8      |
| 1.5 Le standard ANSI .....  | 13     |
| 1.6 Choix d'un ajustement .....   | 18     |
| <br>II Les états de surface   | <br>24 |
| 2.1 Nécessité de l'étude des états de surface .....                                     | 24     |
| 2.2 Terminologie .....  | 25     |
| 2.3 Analyse d'une surface .....   | 26     |
| 2.4 Les critères d'état de surface .....  | 28     |
| 2.5 Spécifications d'un état de surface sur le dessin .....                             | 30     |
| 2.6 Les appareils de mesure d'états de surface .....                                    | 33     |
| 2.7 Procédés de fabrication et états de surface .....                                   | 39     |
| <br>III Les tolérances géométriques   | <br>40 |
| 3.1 Introduction .....  | 40     |
| 3.2 Terminologie .....  | 41     |
| 3.3 Indication des éléments sur le dessin .....   | 42     |
| 3.4 Les tolérances de forme .....   | 44     |
| 3.5 Les tolérances associées .....  | 48     |
| 3.6 Analyse fonctionnelle et attribution des tolérances<br>géométriques .....           | 56     |
| 3.7 Analyse fonctionnelle et calcul des intervalles de<br>tolérances géométriques ..... | 64     |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| IV  | La cotation fonctionnelle                                | 69  |
| 4.1 | Introduction.....  | 69  |
| 4.2 | Terminologie et conventions.....                         | 70  |
| 4.3 | Tracé des chaînes de cotes.....                          | 71  |
| 4.4 | Principes fondamentaux de la cotation fonctionnelle..... | 78  |
| 4.5 | Interdépendance des tolérances des cotes.....            | 83  |
| 4.6 | Applications de la cotation fonctionnelle.....           | 85  |
| 4.7 | Cotation fonctionnelle sur les surfaces inclinées.....   | 100 |
| V   | La cotation au maximum de matière                        | 103 |
| 5.1 | Définition.....  | 103 |
| 5.2 | Le critère de perpendicularité.....                      | 105 |
| 5.3 | Le critère de coaxialité.....                            | 110 |
| 5.4 | Le critère de localisation.....                          | 113 |
| 5.5 | Le critère de symétrie.....                              | 117 |
| 5.6 | Les contrôles.....                                       | 119 |
| VI  | Obtention des bruts                                      | 121 |
| 6.1 | Introduction.....  | 121 |
| 6.2 | Le moulage.....  | 121 |
| 6.3 | Le formage plastique.....                                | 129 |
| 6.4 | Le frittage.....   | 136 |
| VII | Les procédés d'usinage                                   | 137 |
| 7.1 | Introduction.....  | 137 |
| 7.2 | Le découpage.....  | 138 |
| 7.3 | L'usinage par coupe.....                                 | 139 |
|     | - Principe de coupe.....                                 | 140 |
|     | - Le perçage et l'alésage.....                           | 147 |
|     | - Le tournage.....                                       | 158 |
|     | - Le fraisage.....                                       | 167 |
|     | - Le rabotage.....                                       | 183 |
|     | - Le brochage.....                                       | 185 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 7.4  | Travail par abrasion.....  | 188 |
|      | - Le meulage et la rectification.....  | 188 |
|      | - Le rodage.....   | 196 |
|      | - Le polissage.....  | 197 |
| 7.5  | Les procédés physico-chimiques.....  | 198 |
|      | - Usinage par électroérosion.....  | 198 |
|      | - Usinage électrochimique.....   | 202 |
|      | - Le laser à découper.....   | 203 |
| 7.6  | Les procédés d'usinage et les états de surface.....                          | 204 |
| VIII | L'isostatisme  | 206 |
| 8.1  | Définition.....  | 206 |
| 8.2  | Les degrés de liberté et les liaisons.....                                   | 207 |
| 8.3  | L'isostatisme de formes géométriques simples.....                            | 210 |
| 8.4  | Symbolisation et configuration physique des liaisons et<br>des serrages..... | 220 |
| 8.5  | Le serrage.....  | 225 |
| 8.6  | Isostatisme des systèmes de positionnement et de serrage<br>courants.....    | 226 |
| 8.7  | Application de l'isostatisme.....  | 230 |
| IX   | Transfert de cotes et d'orientations   | 237 |
| 9.1  | Introduction.....  | 237 |
| 9.2  | Les cotes de fabrication.....  | 238 |
| 9.3  | Transfert de cotes dimensionnelles.....                                      | 243 |
| 9.4  | Transfert d'orientations.....  | 252 |
| X    | Gamme d'usinage  | 257 |
| 10.1 | Introduction.....  | 257 |
| 10.2 | Terminologie.....  | 258 |
| 10.3 | Elaboration de la gamme d'usinage: données générales.....                    | 260 |
| 10.4 | Lecture du dessin de définition.....   | 273 |
| 10.5 | Analyse des antériorités.....  | 275 |
| 10.6 | Rédaction de la gamme d'usinage.....   | 281 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| XI   | La géométrie descriptive               | 288 |
| 11.1 | Introduction.....                      | 288 |
| 11.2 | Notions fondamentales.....             | 289 |
|      | - Projections d'un point.....          | 290 |
|      | - Projection d'une droite.....         | 294 |
|      | - Projection d'un plan.....            | 301 |
|      | - Les lignes de plus grande pente..... | 310 |
| 11.3 | Les méthodes de transformation.....    | 314 |
|      | - Le changement de plans.....          | 314 |
|      | - La rotation.....                     | 317 |
|      | - Le rabattement.....                  | 320 |
| 11.4 | Applications.....                      | 325 |

## VOLUMES DE REFERENCE

- 1- R. Quatremer et J.P. Trotignon, "Précis de construction mécanique: 1. dessin, conception et normalisation", 5<sup>e</sup> édition, AFNOR, (Nathan, Paris, 1978).
- 2- A. Chevalier, "Guide du dessinateur industriel", (Hachette. Edition 1983 - 1984).
- 3- Ruper Legrand (éditeur), "The American Machinist's Handbook", (McGraw - Hill, 1968).
- 4- Paul B. Schubert (éditeur). "Machinery's Handbook", (Industrial Press, New York, 1982).
- 5- Francis T. Farago, "Handbook of Dimensional Measurement", (Industrial Press, New York, 1968).
- 6- Lowel W. Foster, "Geo-metrics, The Metric Application", (Addison - Wesley Publishing Co, 1974).
- 7- R. Pasquet et al., "La cotation fonctionnelle dans le dessin de définition", (Dunod, 1967).
- 8- P. Padilla et A. Thely, "Guide des fabrications mécaniques", (Dunod, 1978).
- 9- Heine - Loper - Rosenthal, "Principles of Metal Casting", second édition, (McGraw - Hill, 1967).
- 10- R. Dietrich et al., "Précis de construction mécanique: 2. méthodes de fabrication et normalisation), 4<sup>e</sup> édition, AFNOR, (Nathan, Paris, 1979).
- 11- John R. Walker, "Machining Fundamentals", (The Goodheart - Willcox Co, inc, 1977).
- 12- John L. Feirer, "Machine Tool Metalworking", second édition, (McGraw - Hill, 1973).
- 13- F. H. Hallet and A.E. Mills, "Technology for Industrial Manufacturing", (Macmillan of Canada, 1972).
- 14- Krar - Oswald - St-Amand, "Technology of Machine Tools", (McGraw Hill, 1969).

- 15- Amitabha Battacharya and Inyong Ham, "Design of Cutting Tools", (Society of Tool and Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1969).
- 16- J. Vergnas, "Usinage: Technologie et pratique", (Dunod, 1982).
- 17- Roland Weill, "Techniques d'usinage" (Dunod, 1971).
- 18- Camya et Rollet, "Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens", Tome II, (les éditions Foucher, Paris, 1971).
- 19- Technical staff of the machinability data center, "Machinery Data Handbook", Third édition, Volume II, (Metcut Research Associates Inc, Cincinnati, Ohio, 1980).
- 20- Tolerance Chart Service Co (Olivies R. Wade), "Tolérance Control in Design and Manufacturing", (Industrial Press, New York, 1967).
- 21- Jack Karr, "Méthodes et analyses de fabrication mécanique", (Dunod, 1979).
- 22- M. Paoletti, "Etude logique des gammes d'usinage", Desforges, Paris, 1975).



# CHAPITRE I

## TOLERANCES DIMENSIONNELLES ET

## AJUSTEMENTS

### 1.1 Définition d'une cote

Une cote peut représenter la distance entre (figure 1.1):

- deux surfaces planes parallèles (cotes  $A_1$  et  $A_2$ ).
- une surface plane et un axe (cotes  $B_1$  et  $B_2$ ).
- deux axes parallèles (cote  $C$ ).
- deux génératrices diamétralement opposées d'un arbre (cote  $D$ ).
- d'un alésage (cote  $E$ ).

Une cote peut aussi désigner un angle entre:

- deux surfaces planes (cote  $F$ ).
- deux axes.

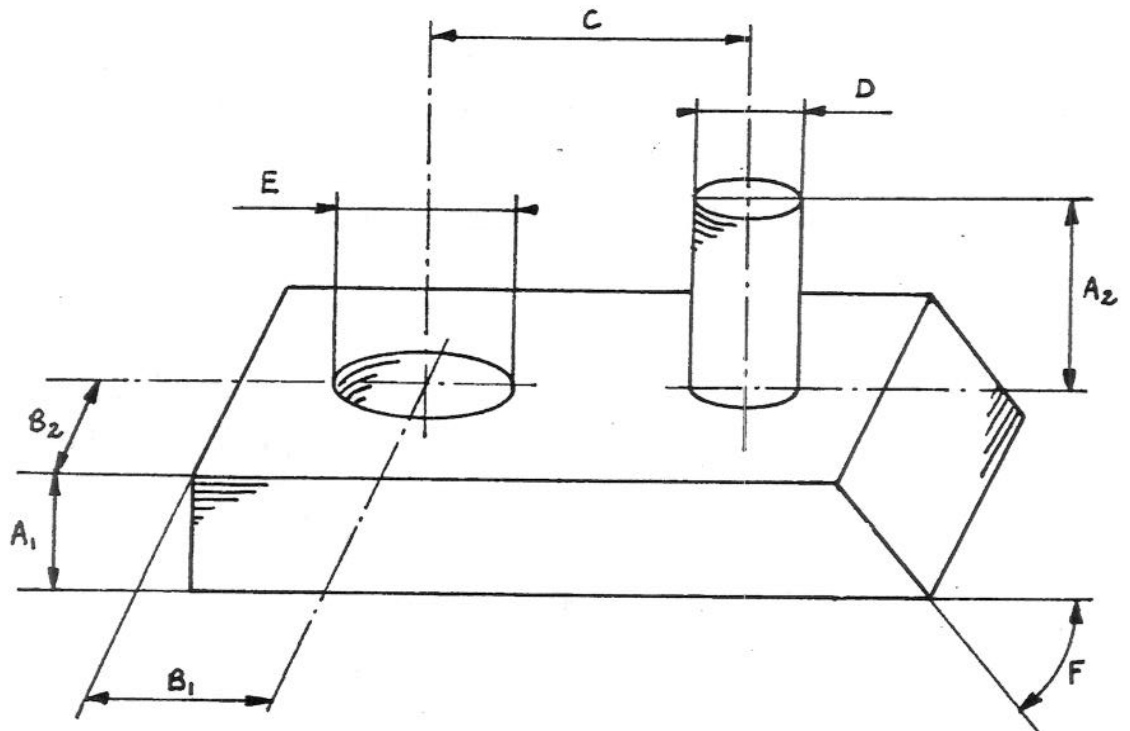


Figure 1.1: Les différents types de cotes sur une pièce mécanique

## 1.2 Introduction et terminologie

Soit la cote 25.0000 millimètres (mm.) où aucun écart n'est toléré de part et d'autre de la dimension de 25 mm., une cote avec une telle rigueur dimensionnelle ne peut pas être obtenue par les procédés d'usinage conventionnels à cause de leur imprécision inévitable. Il faut donc tolérer que la dimension effectivement réalisée soit comprise entre deux limites admissibles proches de la cote désirée et compatibles avec le fonctionnement correct de la pièce possédant cette cote. La différence entre ces deux limites admissibles sera appelée l'INTERVALLE DE TOLERANCE (IT).

Donc, sans affecter la fonction souhaitée de la pièce, la cote de 25.0000 mentionnée ci-dessus peut être tolérancée à l'intérieur de deux limites admissibles, par exemple:

-limite admissible maximum = 25.010 mm.

-limite admissible minimum = 24.970 mm.

L'intervalle de tolérance sera donc:  $25.010 - 24.970 = 0.040$  mm. soit  $40 \mu\text{m}$  (\*). Cette nouvelle cote avec tolérance va s'écrire comme suit:

$25 \begin{smallmatrix} +10 \\ -30 \end{smallmatrix}$

où \*25 qui est généralement un entier s'appelle la COTE NOMINALE

\*les écarts admissibles à partir de cote nominale (25)

sont exprimés en  $\mu\text{m}$

### Représentation graphique de cet exemple

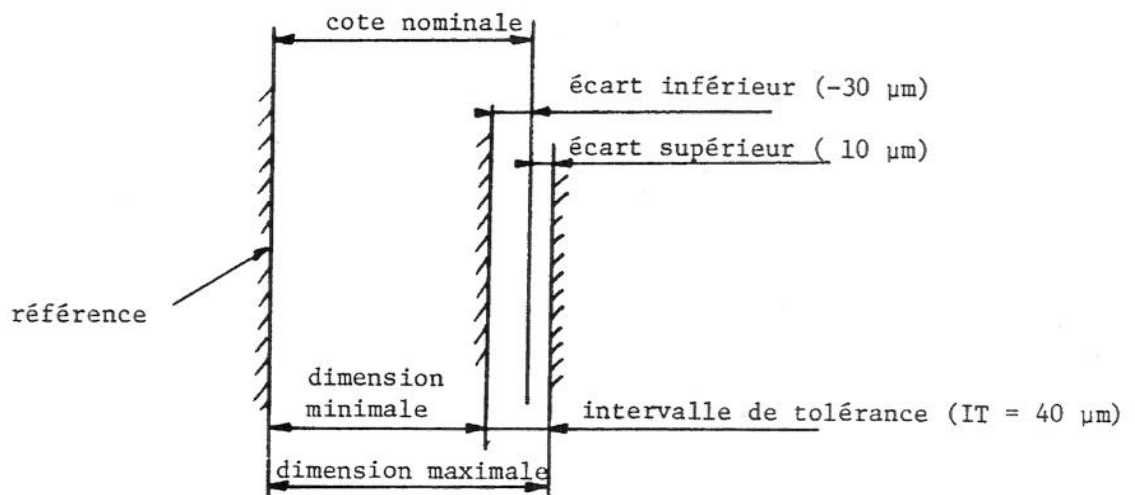


Figure 1.2: Représentation graphique d'une cote avec intervalle de tolérance.

(\*)  $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 10^{-3} \text{ mm}$  et  $25.4 \mu\text{m} = \frac{1}{1000} \text{ pouce}$ .

La figure 1.2 montre la cote nominale (25.0000) à partir de laquelle se situent les écarts inférieur et supérieur qui définissent respectivement les dimensions admissibles minimale et maximale de cette cote avec intervalle de tolérance.

Le procédé d'usinage choisi devra être capable de réaliser une cote de fabrication à l'intérieur de cet intervalle de tolérance tel que situé autour de la cote nominale. Les cotes de fabrication 24.980, 24.990, 24.995 et 25.008 seront donc des cotes de fabrication acceptables pour cet exemple

### 1.3 Le système ISO (International System Organisation)

#### 1.3.a) Définition

Le système ISO définit un ensemble de tolérances à appliquer aux dimensions des pièces lisses. Ces tolérances permettent de normaliser les AJUSTEMENTS (pièces mâles dans pièces femelles).

Pour simplifier la terminologie, on ne traitera explicitement que des ajustements entre pièces cylindriques à section circulaire: ARBRE et ALESAGE. Ce qui sera dit sur ces pièces s'appliquera intégralement à toutes les autres formes d'ajustements; par exemple les ajustements entre deux faces parallèles: largeur de rainure, épaisseur de clavette, ...

### 1.3.b) Principe

Un ajustement entre un arbre (pièce mâle) et un alésage (pièce femelle) est représenté à la figure 1.3. Chacune des deux pièces a la même cote nominale par rapport à laquelle sont situés les écarts respectifs.

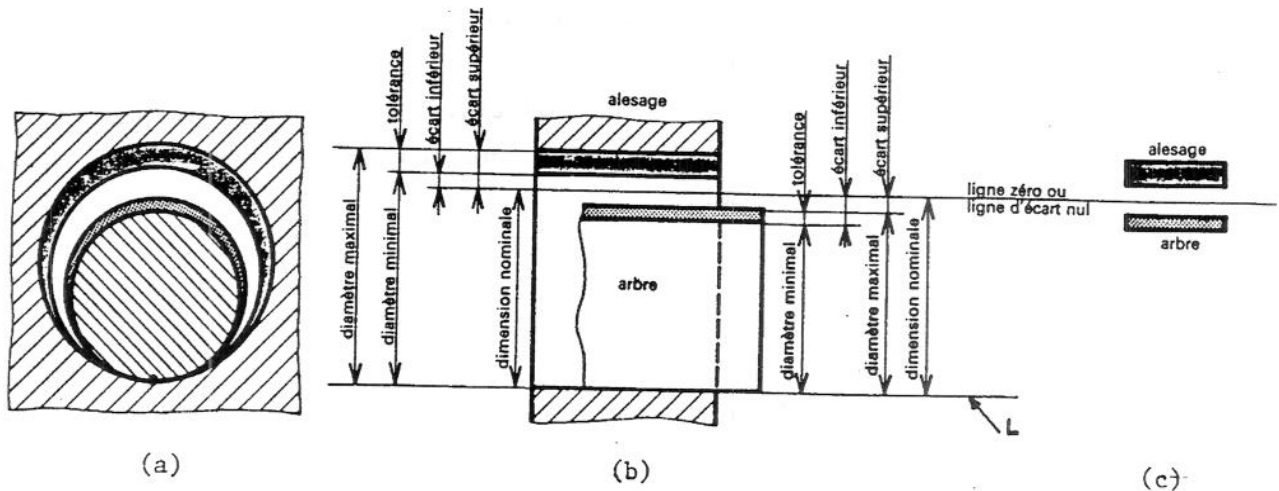


Figure 1.3: Représentation d'un ajustement avec jeu.

La figure 1.3(a) montre une vue frontale de l'ajustement. La ligne L, ligne de contact entre l'arbre et l'alésage, sera la ligne de référence commune à l'arbre et à l'alésage.

La figure 1.3(b) représente latéralement l'ajustement où la dimension nominale est la ligne fictive LIGNE ZERO. A partir de cette ligne se situent les écarts admissibles de l'arbre et de l'alésage. Dans l'exemple de la figure, les deux écarts de l'alésage sont positifs et les deux écarts de l'arbre sont négatifs:

$$\begin{array}{l}
 \text{ALESAGE} \left\{ \begin{array}{l} \text{écart supérieur (ES)} = D \text{ max.} - D \text{ nom.} \\ \text{écart inférieur (EI)} = D \text{ min.} - D \text{ nom} \end{array} \right. \\
 \text{ARBRE} \left\{ \begin{array}{l} \text{écart supérieur (es)} = d \text{ max.} - d \text{ nom.} \\ \text{écart inférieur (ei)} = d \text{ min.} - d \text{ nom.} \end{array} \right.
 \end{array}$$

où les lettres majuscules symbolisent l'alésage et les lettres minuscules l'arbre.

La figure 1.3(c) situe les intervalles de tolérance de l'alésage et de l'arbre par rapport à la ligne zéro. Cet ajustement sera toujours avec jeu. Ce jeu peut varier dépendant des cotes de l'arbre et de l'alésage à l'intérieur de leur respectif intervalle de tolérance.

### 1.3.c) Intervalles de tolérance

Pour chaque dimension nominale, toute une gamme de tolérances est normalisée. La valeur de ces tolérances est symbolisée par un chiffre appelé la QUALITE. Il existe 18 qualités disponibles: 01-0-1-2-3 ..... 15-16 qui correspondent chacune à des intervalles de tolérances fondamentaux. Le tableau 1.1 donne les 18 qualités disponibles en fonction des dimensions nominales.

|  |              | TOLÉRANCES FONDAMENTALES |     |     |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |      |      |      |
|--|--------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| Qualité  |              | 01                       | 0   | 1   | 2   | 3   | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14*  | 15*  | 16*  |
| Tolérances fondamentales en micromètres pour paliers de diamètres en millimètres | ≤ 30         | 3                        | 0,5 | 0,8 | 1,2 | 2   | 3  | 4  | 6  | 10 | 14 | 25  | 40  | 60  | 100 | 140 | 250  | 400  | 600  |
|  | > 3 à 60     | 4                        | 0,6 | 1   | 1,5 | 2,5 | 4  | 5  | 8  | 12 | 18 | 30  | 48  | 75  | 120 | 180 | 300  | 480  | 750  |
|  | > 6 à 100    | 4                        | 0,6 | 1   | 1,5 | 2,5 | 4  | 6  | 9  | 15 | 22 | 36  | 58  | 90  | 150 | 220 | 360  | 580  | 900  |
|  | > 10 à 180   | 5                        | 0,8 | 1,2 | 2   | 3   | 5  | 8  | 11 | 18 | 27 | 43  | 70  | 110 | 180 | 270 | 430  | 700  | 1100 |
|  | > 18 à 300   | 6                        | 1   | 1,5 | 2,5 | 4   | 6  | 9  | 13 | 21 | 33 | 52  | 84  | 130 | 210 | 330 | 520  | 840  | 1300 |
|  | > 30 à 500   | 6                        | 1   | 1,5 | 2,5 | 4   | 7  | 11 | 16 | 25 | 39 | 62  | 100 | 160 | 250 | 390 | 620  | 1000 | 1600 |
|  | > 50 à 800   | 8                        | 1,2 | 2   | 3   | 5   | 8  | 13 | 19 | 30 | 46 | 74  | 120 | 190 | 300 | 460 | 740  | 1200 | 1900 |
|  | > 80 à 1200  | 1                        | 1,5 | 2,5 | 4   | 6   | 10 | 15 | 22 | 35 | 54 | 87  | 140 | 220 | 350 | 540 | 870  | 1400 | 2200 |
|  | > 120 à 1800 | 1,2                      | 2   | 3,5 | 5   | 8   | 12 | 18 | 25 | 40 | 63 | 100 | 160 | 250 | 400 | 630 | 1000 | 1600 | 2500 |
|  | > 180 à 2500 | 2                        | 3   | 4,5 | 7   | 10  | 14 | 20 | 29 | 46 | 72 | 115 | 185 | 290 | 460 | 720 | 1150 | 1850 | 2900 |
|  | > 250 à 3150 | 2,5                      | 4   | 6   | 8   | 12  | 16 | 23 | 32 | 52 | 81 | 130 | 210 | 320 | 520 | 810 | 1300 | 2100 | 3200 |
|  | > 315 à 4000 | 3                        | 5   | 7   | 9   | 13  | 18 | 25 | 36 | 57 | 89 | 140 | 230 | 360 | 570 | 890 | 1400 | 2300 | 3600 |
|  | > 400 à 5000 | 4                        | 6   | 8   | 10  | 15  | 20 | 27 | 40 | 63 | 97 | 155 | 250 | 400 | 630 | 970 | 1550 | 2500 | 4000 |

Tableau 1.1: Les intervalles de tolérances fondamentaux (qualité). Les dimensions nominales sont données en mm. et les qualités en µm.

### Commentaires au sujet du tableau 1.1

- 1- A qualité égale, les intervalles de tolérance augmentent avec la dimension nominale.
- 2- A un indice de qualité faible correspond un faible intervalle de tolérance. Plus l'indice de qualité sera faible plus le coût de production sera élevé car pour réaliser une cote dans un petit intervalle de tolérance il faudra une machine-outil de précision et plus de soin et de précautions seront à prendre.

Les données fournies au tableau 1.1 ne suffisent pas à désigner complètement une cote avec tolérances. Rien n'indique encore la position de ces intervalles de tolérance par rapport à la ligne zéro.

#### 1.3.d) Position des tolérances

La position des intervalles de tolérance par rapport à la ligne zéro est symbolisée par une ou deux lettres:

- de A à Z pour les alésages (MAJUSCULE)
- de a à z pour les arbres (minuscule)

Les figures 1.4 et 1.5 schématisent les différentes positions possibles des intervalles de tolérance.

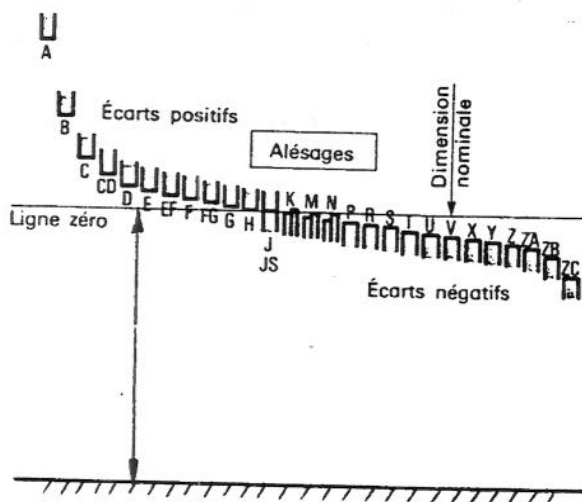


Figure 1.4: Positions schématisées des tolérances par rapport à la ligne zéro (cote nominale) d'un alésage.

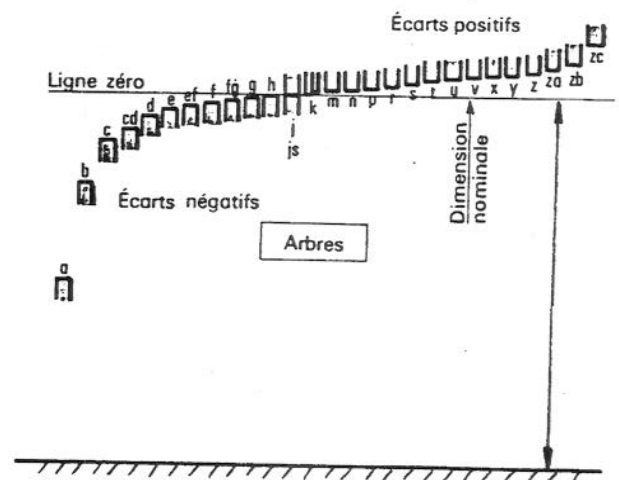


Figure 1.5: Positions schématisées des tolérances par rapport à la ligne zéro (cote nominale) d'un arbre.

Commentaires au sujet des schémas de positions (figure 1.4 et 1.5)

- 1- Les premières lettres de l'alphabet (A et a) correspondent à l'état minimal matière pour l'ajustement alésage/arbre, c'est-à-dire que la dimension de l'alésage est maxi et celle de l'arbre est minimum.
- 2- La lettre H d'un alésage correspond au cas où la dimension minimale permise de l'alésage correspond à la cote nominale. L'intervalle de tolérance tangente supérieurement la ligne zéro. L'écart inférieur est donc nul.
- 3- La lettre h d'un arbre correspond au cas où la dimension maximale permise de l'arbre correspond à la cote nominale. L'intervalle de tolérance tangente inférieurement la ligne zéro. L'écart supérieur est donc nul.
- 4- La lettre J d'un alésage correspond au cas où l'intervalle de tolérance tangente inférieurement la ligne zéro.
- 5- La lettre j d'un arbre correspond au cas où l'intervalle de tolérance tangente supérieurement la ligne zéro.
- 6- Les lettres JS et js signifient que les intervalles de tolérance de J et j sont positionnées symétriquement par rapport à la ligne zéro.
- 7- Les positions d'intervalles de tolérance les plus usuelles sont quantifiées sous forme de tableau à la fin de ce chapitre, (tableau 1.3, page 20)

#### 1.3.e) Désignation d'une cote avec tolérances

Une cote d'alésage tolérancées s'écrit 24 H 7, où:

24 représente la dimension nominale (mm.)

H (majuscule) symbolise que:

- 1- cette cote est attribuée à un alésage
- 2- l'intervalle de tolérance tangente supérieurement la ligne zéro.

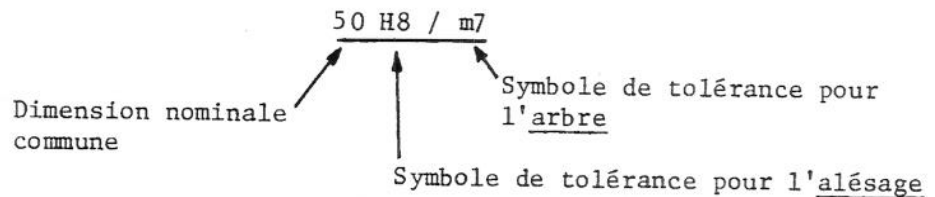
7 symbolise la valeur de l'intervalle de tolérance.  
Le tableau 1.1 donne un IT de 21  $\mu\text{m}$  pour cette dimension nominale.

De façon identique pour un arbre; dans 24 f 6,  
24 représente la dimension nominale  
f (minuscule) symbolise que:  
1- la cote est attribuée à un arbre  
2- la position de l'intervalle de tolérance  
6 symbolise un it de 13  $\mu\text{m}$  d'après le tableau 1.1.

#### 1.4 Ajustements

##### 1.4.a) Type d'ajustements

Un ajustement est constitué par l'assemblage de deux pièces de même dimension nominale. Il est désigné par cette dimension nominale suivie des symboles correspondant à chaque pièce, en commençant par l'alésage, exemple:



Un ajustement désigné peut être:

- avec jeu
- incertain, c'est-à-dire pouvant présenter tantôt un jeu, tantôt un serrage.
- avec serrage.

Exemple: L'ajustement 50 H8 / m7 sera-t-il avec jeu, incertain ou avec serrage?

##### Solution

D'après le tableau page 23: 50 H8 désigne un alésage de 50  $\begin{smallmatrix} +39 \\ +0 \end{smallmatrix}$   
50 m7 désigne un arbre de 50  $\begin{smallmatrix} +34 \\ +9 \end{smallmatrix}$



Représentation graphique de cet ajustement:

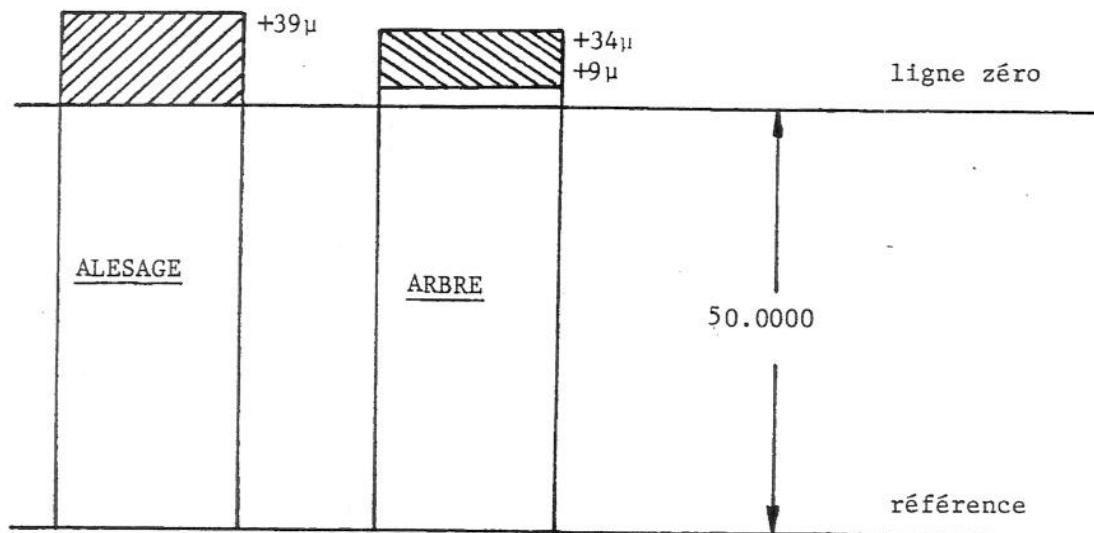


Figure 1.6 -Représentation graphique de l'ajustement 50 H8 / m7.

L'écart de cote maxi entre l'alésage et l'arbre est:

$$D_{\max} - d_{\min} = 50.039 - 50.009 = 0.03 \text{ soit } + 30 \mu \text{ (jeu)}$$

L'écart de cote mini entre l'alésage et l'arbre est:

$$D_{\min} - d_{\max} = 50.000 - 50.034 = - 0.034 \text{ soit } - 34 \mu \text{ (serrage)}$$

Dépendant des dimensions réelles de l'arbre et de l'alésage à l'intérieur de leur respectif intervalle de tolérance, cet ajustement peut présenter du jeu comme du serrage, il est donc incertain.

En résumé, pour connaître le type d'un ajustement, il faut calculer ses écarts de cote maximum et minimum; ces écarts sont des valeurs algébriques tels que:

$$\text{Ecart de cote maxi} = D_{\max} - d_{\min}$$

$$\text{Ecart de cote mini} = D_{\min} - d_{\max}$$

où les lettres D et d symbolisent respectivement l'alésage et l'arbre.

Un écart de cote positif signifie du jeu tandis qu'un écart négatif signifie du serrage.

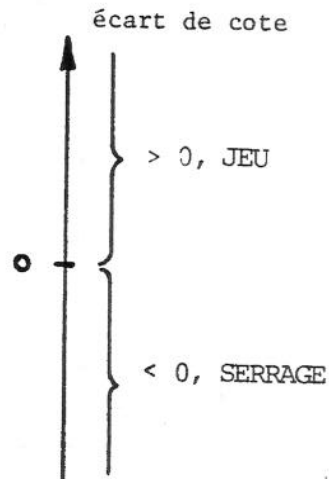
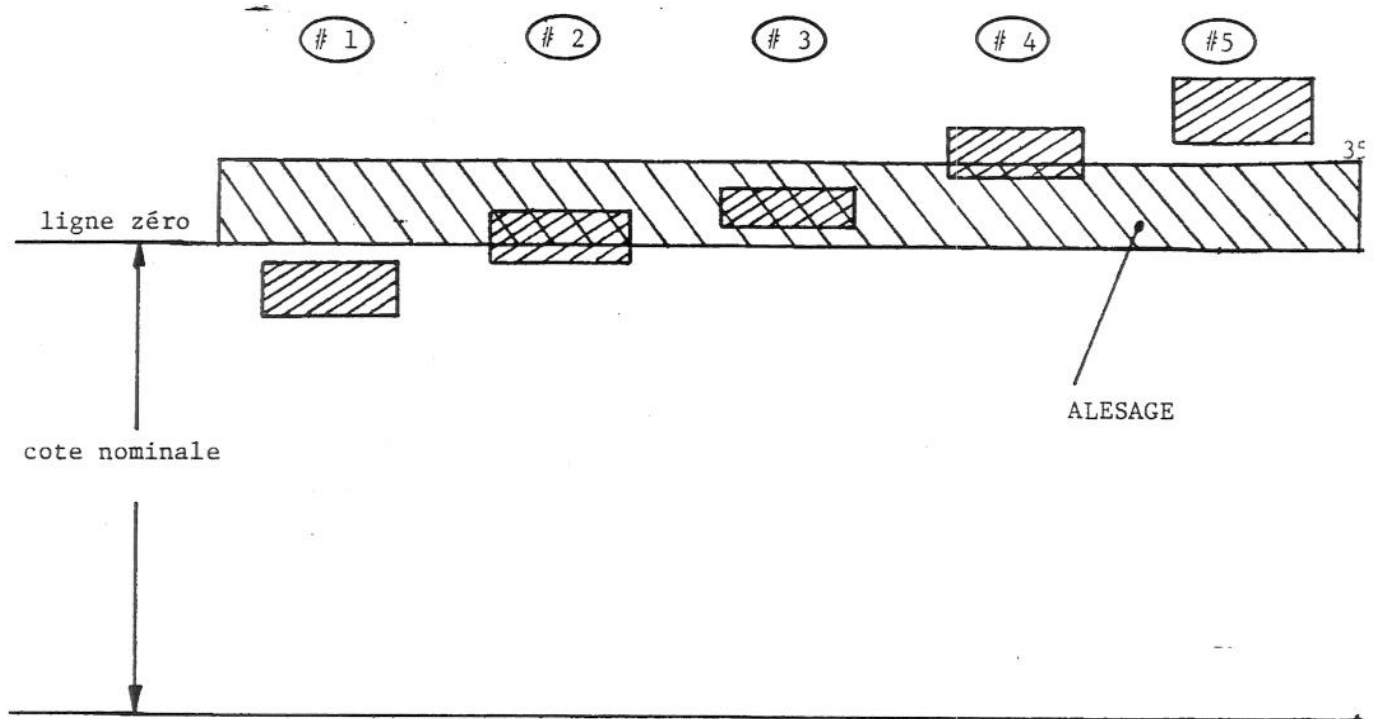


Figure 1.7 Représentation algébrique des écarts de cote.  
Le signe indique si l'écart se situe dans le domaine jeu ou serrage.

A partir d'un intervalle de tolérance d'alésage fixe, la figure 1.8 schématise cinq ajustements différenciés par la position et la qualité de l'intervalle de tolérance de l'arbre. L'ajustement # 1 est avec jeu, les ajustements # 2, 3 et 4 sont incertains, l'ajustement # 5 est avec serrage.



**Figure 1.8** Schématisation d'ajustements avec jeu, incertains et avec serrage. Noter que tous les cinq ajustements sont associés à l'alésage.

#### 1.4.b) Ajustements associés

Afin de réduire le nombre d'ajustements possibles, ce qui diminue par le fait même le nombre d'outils à usiner (exemple: alésoirs), le système ISO permet de choisir des ajustements associés à l'arbre ou à l'alésage.

Ajustements associés à l'arbre (figure 1.9): la position de l'intervalle de tolérance de tous les arbres est donnée par la lettre minuscule h (tangence inférieure à la ligne zéro). L'ajustement désiré est obtenu en faisant varier la position de l'intervalle de tolérance de l'alésage.

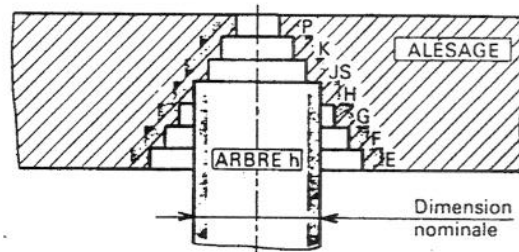


Figure 1.9 Schématisation d'ajustements associés à l'arbre

Les ajustements associés à l'arbre sont réservés à des applications bien définies comme par exemple le montage des bagues extérieures de roulements à billes. Les ajustements associés à l'alésage sont plus fréquemment employés.

Ajustements associés à l'alésage (figure 1.10). La position de l'intervalle de tolérance de tous les alésages est maintenant donnée par la lettre majuscule H (tangence supérieure à la ligne zéro). L'ajustement désiré est obtenu en faisant varier la position de l'intervalle de tolérance de l'arbre.

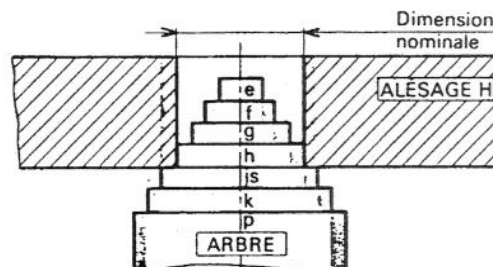


Figure 1.10 Schématisation d'ajustements associés à l'alésage

Les ajustements associés à l'alésage doivent être employés dans tous les cas où cela est possible car il est plus facile de réaliser différentes positions de tolérance sur un arbre que dans un alésage. L'alésage est généralement terminé par un outil affûté (alésoir) tandis que l'arbre est directement réalisé sur une machine qui présente plus de flexibilité quant au réglage de l'outil de coupe.

Remarque 1:

42 H7 / f6 est un ajustement associé à l'alésage  
42 K8 / h7 est un ajustement associé à l'arbre.

Remarque 2: Les deux ajustements 16 H8 / f6 et 16 F6 / h8 associés respectivement à l'alésage et à l'arbre vont donner les mêmes écarts de cote.

Remarque 3: Du fait qu'un arbre soit plus facile à réaliser qu'un alésage, on associe habituellement un alésage de qualité donnée avec un arbre de qualité voisine supérieure.

Exemples 42 H7 / f6 et 32 H8 / g6 sont suggérés  
plutôt que 12 H6 / n8

## 1.5 Le standard ANSI (American National Standard Institut).

Malgré que le Système International (SI) soit en cours d'implantation en Amérique du nord, il est inévitable que des plans de pièces utilisant le standard nord-américain ANSI soient encore en circulation. Le but de ce paragraphe est de présenter le standard ANSI et de donner la correspondance entre les deux systèmes, ISO et ANSI.

### 1.5.a) Présentation du standard ANSI

Dans ce système, tous les ajustements sont des ajustements associés à l'alésage. La cote nominale est donnée en fractions de pouce usuelles. Les valeurs des intervalles de tolérance sont données en millièmes de pouce, mais demeurent équivalentes aux valeurs du système ISO. La désignation d'un ajustement comprend deux lettres majuscules suivies d'un chiffre d'après la nomenclature suivante:

|   |                       |
|---|-----------------------|
| RC 1 à RC 9: ajustements glissants et tournants         | } avec <u>JEU</u>     |
| LC 1 à LC 11: ajustements de positionnement libre       |                       |
| LT 1 à LT 6: ajustement intermédiaire de positionnement | } <u>INCERTAIN</u>    |
| LN 1 à LN 6: ajustement serré de positionnement         |                       |
| FN 1 à FN 5: ajustement forcé ou fretté                 | } avec <u>SERRAGE</u> |

Le standard ANSI réduit le choix d'ajustements car la nomenclature choisie impose une position et une valeur de l'intervalle de tolérance aussi bien à l'arbre qu'à l'alésage. Le tableau 1.2, extrait de "Machinery's Handbook", montre la présentation adoptée pour quelques ajustements RC.

Table 2. American National Standard Running and Sliding Fits (ANSI B4.1-1967, R1974)  
Tolerance limits given in body of table are added or subtracted to basic size (as indicated by + or - sign) to obtain maximum and minimum sizes of mating parts.

| Nominal Size Range, Inches | Class RC 1                                       |                | Class RC 2                |                | Class RC 3                |               | Class RC 4                |              |
|----------------------------|--|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|---------------|---------------------------|--------------|
|                            | Standard Tolerance Limits                        |                | Standard Tolerance Limits |                | Standard Tolerance Limits |               | Standard Tolerance Limits |              |
|                            | Hole H5  | Shaft s4       | Hole H6                   | Shaft s5       | Hole H7                   | Shaft f6      | Hole H8                   | Shaft f7     |
| Over To                    | Values shown below are in thousandths of an inch |                |                           |                |                           |               |                           |              |
| 0-0.12                     | +0.1<br>0  | -0.1<br>-0.25  | +0.1<br>0                 | -0.1<br>-0.3   | +0.4<br>0                 | -0.3<br>-0.55 | +0.6<br>0                 | -0.3<br>-0.7 |
| 0.12-0.24                  | +0.15<br>0                                       | -0.15<br>-0.3  | +0.15<br>0                | -0.15<br>-0.35 | +0.5<br>0                 | -0.4<br>-0.7  | +0.7<br>0                 | -0.4<br>-0.9 |
| 0.24-0.40                  | +0.2<br>0  | -0.2<br>-0.35  | +0.2<br>0                 | -0.2<br>-0.45  | +0.6<br>0                 | -0.5<br>-0.9  | +0.9<br>0                 | -0.5<br>-1.1 |
| 0.40-0.71                  | +0.25<br>0                                       | -0.25<br>-0.45 | +0.25<br>0                | -0.25<br>-0.55 | +0.7<br>0                 | -0.6<br>-1.0  | +1.0<br>0                 | -0.6<br>-1.3 |
| 0.71-1.19                  | +0.3<br>0  | -0.3<br>-0.55  | +0.3<br>0                 | -0.3<br>-0.7   | +0.8<br>0                 | -0.8<br>-1.3  | +1.2<br>0                 | -0.8<br>-1.6 |
| 1.19-1.97                  | +0.4<br>0  | -0.4<br>-0.7   | +0.4<br>0                 | -0.4<br>-0.8   | +1.0<br>0                 | -1.0<br>-1.6  | +1.6<br>0                 | -1.0<br>-2.0 |
| 1.97-3.15                  | +0.5<br>0  | -0.5<br>-0.7   | +0.5<br>0                 | -0.5<br>-0.9   | +1.2<br>0                 | -1.2<br>-1.9  | +1.8<br>0                 | -1.2<br>-2.4 |
| 3.15-4.73                  | +0.6<br>0  | -0.6<br>-0.9   | +0.6<br>0                 | -0.6<br>-1.1   | +1.4<br>0                 | -1.4<br>-2.3  | +2.2<br>0                 | -1.4<br>-2.8 |
| 4.73-7.09                  | +0.7<br>0  | -0.7<br>-1.1   | +0.7<br>0                 | -0.7<br>-1.3   | +1.6<br>0                 | -1.6<br>-2.6  | +2.5<br>0                 | -1.6<br>-3.2 |
| 7.09-9.85                  | +0.8<br>0  | -0.8<br>-1.2   | +0.8<br>0                 | -0.8<br>-1.4   | +1.8<br>0                 | -1.8<br>-3.2  | +2.8<br>0                 | -1.8<br>-3.8 |
| 9.85-12.41                 | +0.9<br>0  | -0.9<br>-1.4   | +0.9<br>0                 | -0.9<br>-1.7   | +2.0<br>0                 | -2.0<br>-3.7  | +3.0<br>0                 | -2.0<br>-4.5 |
| 12.41-15.75                | +1.0<br>0  | -1.0<br>-1.7   | +1.0<br>0                 | -1.0<br>-2.0   | +2.2<br>0                 | -2.2<br>-4.4  | +3.5<br>0                 | -2.2<br>-5.2 |
| 15.75-19.69                | +1.2<br>0  | -1.2<br>-2.0   | +1.2<br>0                 | -1.2<br>-2.2   | +2.5<br>0                 | -2.5<br>-5.6  | +4.0<br>0                 | -2.5<br>-6.5 |

Tableau 1.2 - Standard ANSI - Tableau de tolérances RC 1 à RC 4

Soit l'ajustement 0.750 RC<sub>2</sub>, le tableau 1.2 indique:

$$\text{alésage} = 0.750 + \begin{matrix} +0.0005 \\ +0 \end{matrix}$$

$$\text{arbre} = 0.750 - \begin{matrix} -0.0003 \\ -0.0007 \end{matrix}$$

Les écarts de cote qui peuvent être calculés sont donnés dans le tableau à la colonne "clearance", dans ce cas:

$$\text{écart maxi} = 1.2 \text{ millième de pouce}$$

$$\text{écart mini} = 0.3 \text{ " " "}$$

Le tableau 1.2 donne également la correspondance avec le système ISO. Cet ajustement est un ajustement H6 g5 dans le système ISO. Remarquer la qualité supérieure de l'arbre par rapport à l'alésage.

En pratique, ces différents types d'ajustements sont choisis dans les cas d'assemblage suivants:

**RC1 Ajustement glissant juste**, sert d'ajustement de position précise pour des pièces assemblées sans jeu perceptible, pour l'assemblage de grande précision, les jauges par exemple.

**RC2 Ajustement glissant** destiné aux ajustements de précision, mais avec un jeu plus grand que celui du RC1. Les pièces usinées avec cette précision tournent facilement, mais ne sont pas destinées à tourner librement. Pour les diamètres plus grands, elles peuvent se resserrer à la suite d'une légère variation de température.

(Nota : LC1 et LC2, ajustements de position libres, peuvent aussi être choisis comme ajustements glissants avec des tolérances plus grandes.)

**RC3 Ajustement tournant très précis**, destiné aux roulements huilés des plus précis, tournant à faible vitesse et sous des charges légères, mais il n'est pas approprié dans des conditions de température variables.

**RC4 Ajustement tournant précis**, destiné surtout aux roulements huilés ou graissés, soumis à des efforts modérés et tournant à des vitesses périphériques moyennes, tout en ayant un jeu minimal.

**RC5 et RC6 Ajustements tournants intermédiaires**, destinés aux mécanismes tournant à des vitesses plus élevées et/ou soumis aux variations de température.

**RC7 Ajustement tournant libre**, destiné aux mécanismes n'exigeant pas une grande précision et/ou soumis à de grandes variations de température.

**RC8 et RC9 Ajustements tournants très libres**, destinés à des pièces fabriquées à des tolérances strictement utilitaires, telles que arbres, tubes et autres pièces laminées à froid, etc.

#### AJUSTEMENTS DE POSITION

Les ajustements de position servent uniquement à localiser avec précision deux pièces d'un assemblage l'une contre l'autre. Ils peuvent servir pour une mise en place précise et rigide, telle que dans les ajustements serrés, ou permettre un certain jeu dans la position, comme dans les ajustements libres. C'est pourquoi on les subdivise en trois catégories : ajustements libres, ajustements intermédiaires et ajustements serrés.

#### AJUSTEMENTS DE POSITION LIBRES

On utilise les ajustements libres pour les pièces ordinairement immobiles, mais que l'on doit monter ou démonter facilement. Ces ajustements varient entre les ajustements serrés de position précise et les ajustements intermédiaires pour certaines pièces, comme les ergots par exemple, jusqu'aux ajustements où la facilité d'assemblage prime avant tout.

On les classe comme suit :

**LC1 à LC4. Théoriquement**, ces ajustements ont un jeu égal à zéro, mais en pratique il y a toujours un jeu. Cette série d'ajustements convient particulièrement pour déterminer la position de pièces immobiles et d'ergots, quoique les ajustements LC1 et LC2 peuvent aussi servir d'ajustements glissants.

**LC5 et LC6.** Le jeu minimal réduit de ces ajustements est tout désigné pour obtenir l'assemblage précis de deux pièces fixes. LC5 peut aussi remplacer RC2 comme ajustement glissant libre, et LC6 s'utilise comme ajustement intermédiaire tournant dont les marges de tolérance sont plus grandes que celles des ajustements RC5 et RC6.

**LC7 à LC11.** Ces ajustements, dont les marges de tolérance sont de plus en plus grandes, servent à divers ajustements avec jeu pour l'assemblage de pièces boulonnées et autres pièces du même genre.

#### AJUSTEMENTS INTERMÉDIAIRES DE POSITION

Les ajustements intermédiaires de position sont un compromis entre les ajustements libres et les ajustements glissant juste, utilisés pour les assemblages où la localisation précise des pièces est importante et qui exigent un jeu minime ou un léger serrage.

On les classe comme suit :

**LT1 et LT2.** Ces ajustements à jeu ordinairement très faible, qui permettent l'assemblage sans détérioration des pièces, s'utilisent dans les cas où le jeu maximal doit être moindre que pour les ajustements de LC1 à LC3. Les pièces peuvent s'assembler sous une faible pression ou à l'aide de légers coups de marteau.

**LT3 et LT4.** Ces ajustements n'ont presque pas de jeu et s'emploient dans les cas où un léger serrage est acceptable, afin d'éliminer les vibrations. On les nomme aussi *ajustements pour clavettes* et on les utilise pour ce type de montage sur arbre, ainsi que pour les roulements à billes. L'assemblage se fait ordinairement à la presse ou au maillet.

**LT5 et LT6.** Ces ajustements ont généralement un léger serrage, assez dur dans les cas d'ajustement extrême, ce qui oblige parfois à assortir les pièces pour l'assemblage. Ils sont conçus pour le montage claveté lourd, celui des bagues de roulements à billes soumis à de fortes vibrations et aux grands efforts, ainsi que pour le montage légèrement dur de pièces d'acier.

#### AJUSTEMENTS SERRÉS DE POSITION

Les ajustements serrés de position servent aux assemblages de grande précision dans lesquels la position et l'alignement sont essentiels, sans égard aux pressions exercées sur l'alésage. Cependant, ils ne sont pas conçus pour la transmission de charges par effet de friction entre les pièces, cette fonction étant celle des ajustements serrés.

On les classe comme suit :

**LN1 et LN2.** Ces ajustements offrent un léger serrage minimal, tout désigné pour les chevilles par exemple, que l'on monte à l'aide d'une presse à mandrin dans l'acier, la fonte ou le laiton. On peut ordinairement démonter et remonter les pièces. Le métal ne subissant pas de déformation permanente. Ces ajustements sont cependant trop peu serrés pour les matériaux élastiques ou les alliages légers.

**LN3.** Cet ajustement est approprié pour un montage sous forte pression dans l'acier et le laiton, et utilisé pour l'assemblage sous faible pression dans des matériaux plus élastiques et dans les alliages légers.

**LN4 à LN6.** Bien que le LN4 puisse servir à l'assemblage permanent de pièces d'a-

cier, ces ajustements sont destinés à l'assemblage à la presse de matériaux plus élastiques ou plus mous, tels les alliages légers et les plastiques rigides.

#### AJUSTEMENTS FORCÉS OU FRETÉS

Les ajustements forcés ou fretés représentent une forme d'ajustement à forte pression, caractérisés par le maintien d'une pression constante dans l'alésage sur toute la gamme des dimensions. La friction augmente donc presque en fonction du diamètre, et les marges de tolérance sont très faibles afin de maintenir les pressions qui en résultent dans des limites raisonnables.

On peut décrire ces ajustements comme suit :

**FN1** Ajustement légèrement dur qui n'exige qu'une légère pression à l'assemblage et qui donne une liaison plus ou moins permanente. Il est tout désigné pour les pièces de sections réduites, pour les joints à grandes surfaces ou pour les parties extérieures des pièces de fonte.

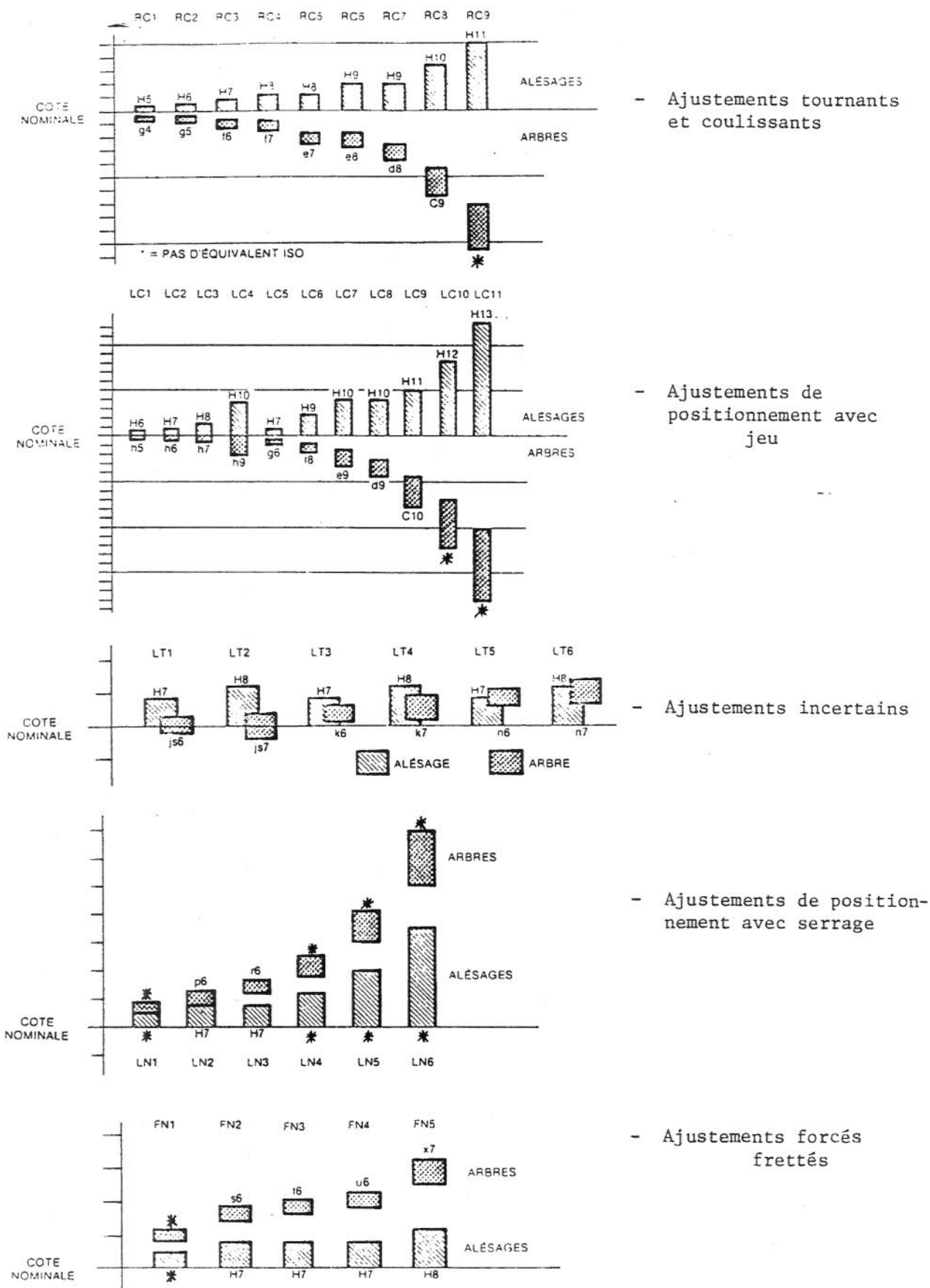
**FN2** Ajustement dur pour l'assemblage de pièces d'acier ordinaires ou pour l'assemblage par dilatation de pièces de sections réduites. Cet ajustement est le plus serré qu'on puisse utiliser dans les parties extérieures de pièces en fonte de haute qualité.

**FN3** Ajustement très dur, spécialement conçu pour l'assemblage de lourdes pièces d'acier ou pour l'assemblage par dilatation dans des pièces d'épaisseur moyenne.

**FN4 et FN5** Ajustements fretés servant à l'assemblage de pièces qui peuvent résister à des efforts considérables et/ou pour l'assemblage par dilatation, lorsqu'on ne peut faire appel aux grands efforts de pression.



## 1.5.b) Correspondance entre le système ISO et le standard ANSI



(\*) Pas d'équivalent ISO.

## 1.6 Choix d'un ajustement

Un ajustement qu'il soit avec jeu ou serrage remplit une fonction précise dans un système mécanique. Afin que le fonctionnement recherché soit correct, le concepteur doit se fixer des jeux ou des serrages limites appelés jeux ou serrages fonctionnels. Ce n'est qu'une fois ces valeurs limites fixées que l'ajustement peut être choisi de la façon suivante:

- 1- Eviter tout excès de précision inutile qui va accroître le coût de production sans améliorer forcément le fonctionnement du système. La figure 1.11 montre la courbe de correspondance entre le coût relatif et la qualité de l'intervalle de tolérance à atteindre.

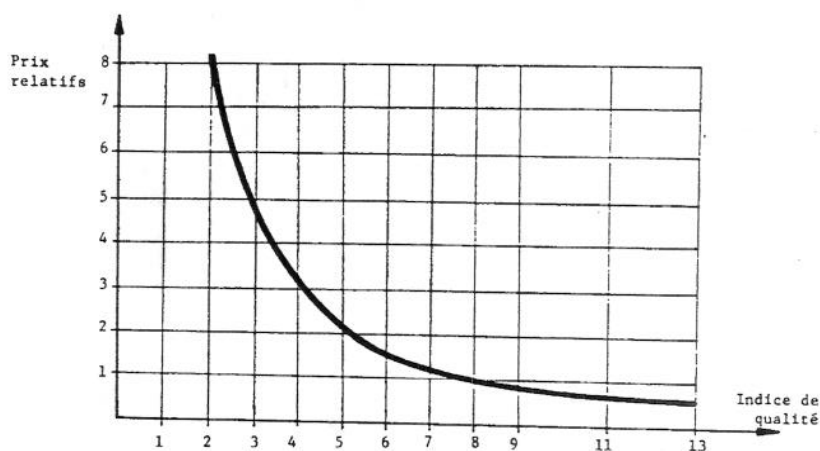


Figure 1.11 Prix relatifs approximatifs d'un usinage en fonction de la qualité de l'intervalle de tolérance.

D'après ce graphique, un passage d'indice de qualité de 8 à 5 double le coût de production. Ce coût est triplé pour un passage d'indice de 8 à 4. Le tableau 1.1 (page 5) donne les intervalles de tolérances correspondant aux indices de qualité et aux cotes nominales.

- 2- Choisir dans les normes et de préférence dans les valeurs les plus couramment utilisées l'ajustement ISO qui comporte des jeux ou des serrages aussi proches que possible des valeurs déterminées par le concepteur.
- 3- Ne pas oublier que l'indice de qualité de l'arbre doit être, autant que possible, inférieur à celui de l'alésage (exemple (exemple = 15 H8 g7)).

Exercice: Un concepteur désire réaliser un ajustement glissant dont la cote nominale est 65 mm et les jeux extrêmes 10 et 60  $\mu\text{m}$ . Quel ajustement associé à l'alésage suggérez-vous?

Solution: Ajustement associé à l'alésage signifie que  $D_{\min} = 65.000$

$$\text{Ecart de cote mini} = D_{\min} - d_{\max}$$

$$10 \mu = 65.000 - d_{\max}$$

$$d_{\max} = 64.990 \text{ ou } 65^{-10}$$

A la page 22, g5 et g6 donnent un écart maxi de  $-10 \mu$

Essayons les deux solutions dans le groupe H6 et H7

$$\underline{\text{H6/g5}} \quad \text{alésage } 65^{+19}_0 \quad \text{et} \quad \text{arbre } 65^{-10}_{-23}$$

$$\text{Jeu mini} = 10 \mu$$

$$\text{Jeu maxi} = 23 + 19 = 42 \mu\text{m}$$

Cet ajustement présente un excès de précision inutile car le jeu maxi permis est 60  $\mu\text{m}$

$$\underline{\text{H7/g6}} \quad \text{alésage } 65^{+30}_0 \quad \text{et} \quad \text{arbre } 65^{-10}_{-29}$$

$$\text{Jeu mini} = 10 \mu$$

$$\text{Jeu maxi} = 30 + 29 \mu = 59 \mu$$

Cet ajustement offre des jeux très proches des jeux extrêmes souhaités.

Réponse: 65 H7 / g6

En conception mécanique, beaucoup d'ajustements sont choisis par expérience. Le tableau 1.3 situe des ajustements en fonction de leurs applications décrites sommairement. Il est suggéré d'utiliser les ajustements courants indiqués dans les zones ombragées.

| 14 ■ 25   |  | PRINCIPAUX AJUSTEMENTS (FD R 910-11)            |   |    |     |   | Arbres* | H 6 | H 7 | H 8 | H 9 | H 11 |
|---|--|---|---|----|-----|---|---------|-----|-----|-----|-----|------|
| Pièces mobiles<br>l'une par rapport à l'autre   | Pièces dont le fonctionnement nécessite un grand jeu (dilatation, mauvais alignement, portées très longues, etc.). |   | c   |    |     |   |         |     |     |     | 9   | 11   |
|   |  |   | d   |    |     |   |         |     |     |     | 9   | 11   |
|   | Cas ordinaire des pièces tournant ou glissant dans une bague ou palier (bon graissage assuré).                     |   | e   |    | 7   | 8 |         |     |     | 9   |     |      |
|   |  |   | f   | 6  | 6-7 | 7 |         |     |     |     |     |      |
|   | Pièces avec guidage précis pour mouvements de faible amplitude   |   | g   | 5  | 6   |   |         |     |     |     |     |      |
| Pièces immobiles<br>l'une par rapport à l'autre | Démontage et remontage possible sans détérioration des pièces  | L'emmanchement ne peut pas transmettre d'effort | Mise en place possible à la main  | h  | 5   | 6 | 7       | 8   |     |     |     |      |
|   |  |   |   | js | 5   | 6 |         |     |     |     |     |      |
|   |  | Mise en place au maillet                        |   | k  | 5   |   |         |     |     |     |     |      |
|   |  |   |   | m  |     | 6 |         |     |     |     |     |      |
|   | Démontage impossible sans détérioration des pièces.  | L'emmanchement peut transmettre des efforts     | Mise en place à la presse   | p  |     | 6 |         |     |     |     |     |      |
|   |  |   | Mise en place à la presse ou par dilatation (vérifier que les contraintes imposées au métal ne dépassent pas la limite élastique) | s  |     |   | 7       |     |     |     |     |      |
|   |  |   |   | u  |     |   | 7       |     |     |     |     |      |
|   |  |   |   | x  |     |   | 7       |     |     |     |     |      |
|   |  |   |   |    |     |   |         |     |     |     |     |      |

Tableau 1.3 Les principaux ajustements utilisés en fonction d'applications mécaniques. Les zones ombragées sont les plus couramment employées.

Une cote de grande qualité, c'est-à-dire avec un faible intervalle de tolérance, ne peut pas être obtenue avec tous les procédés de fabrication. Pour cette raison, il existe une relation entre la qualité de l'intervalle de tolérance et les procédés de fabrication. Celle-ci est représentée graphiquement au tableau 1.4. Il faudra choisir le procédé de fabrication qui sera capable de donner la qualité souhaitée.

| Procédés<br>d'usinage    | Qualités |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
|--------------------------|----------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
|                          | 4        | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Rectification et rodage  |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Rectification circulaire |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Rectification plane      |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Décolletage au diamant   |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Alésage au diamant       |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Brochage                 |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Alésage à l'alésoir      |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Décolletage              |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Alésage                  |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Fraisage                 |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Rabotage et mortaisage   |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |
| Perçage                  |          |   |   |   |   |   |    |    |    |    |

Tableau 1.4 Relation entre la qualité de l'intervalle de tolérance et les procédés de fabrication.









## CHAPITRE II

### LES ETATS DE SURFACE

#### 2.1 Nécessité de l'étude des états de surface

L'aptitude d'une pièce à remplir une fonction donnée dépend d'un ensemble de facteurs et notamment des caractéristiques de ses états de surface (exemple, la rugosité). La mesure de l'état de surface fait partie des contrôles de métrologie au même titre que ceux de cotes et de formes de surface.

Dans beaucoup de systèmes mécaniques, des surfaces frottent les unes sur les autres. Leur état de surface a un grand effet sur le coefficient de frottement, si ce dernier augmente à cause de surfaces rugueuses, les forces de frottement augmentent, les surfaces s'échauffent et l'usure est accélérée.

L'état de surface est également à considérer lorsque des joints d'étanchéité sont installés entre deux surfaces. A la figure 2.1.a un joint d'étanchéité torique est monté sur le piston d'un vérin hydraulique. Le détail du contact joint/alésage est repris à la figure 2.1.b. L'étanchéité souhaitée et la vie du joint dépendent de l'état de surface de l'alésage du vérin.

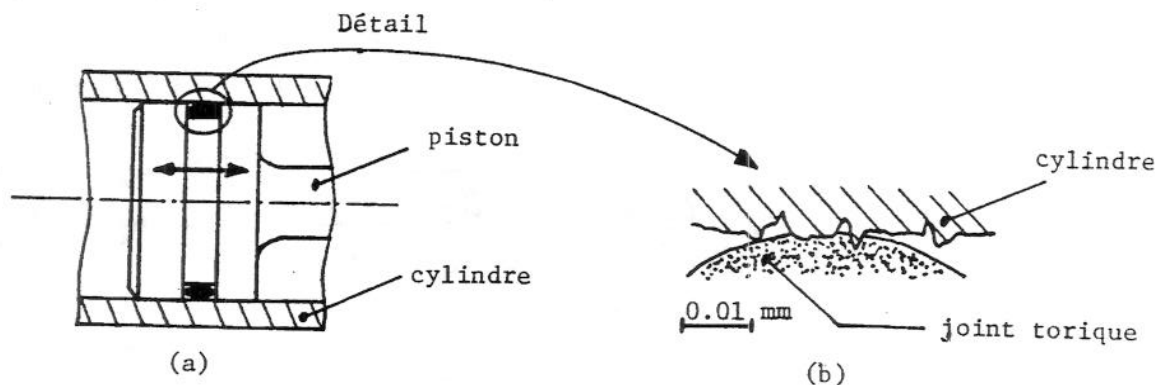


Figure 2.1: (a) Joint torique installé dans un vérin hydraulique  
 (b) Détail du contact entre le joint torique et la surface rugueuse intérieure du cylindre.

## 2.2 Terminologie

Avant d'aborder la définition des critères d'état de surface, certains termes doivent être clarifiés:

Surface géométrique (figure 2.2). C'est une surface parfaite qui est définie géométriquement par des cotes nominales.

Surface spécifiée (figure 2.2). C'est la surface géométrique affectée des tolérances de fabrication. Par exemple, dans le cas des états de surface pour une surface plane, la surface spécifiée est la surface qui possède les rugosités maximums acceptables par rapport à la surface plane parfaite. C'est la surface de rugosités maximums permises.

Surface réelle (figure 2.2). C'est la surface qui résulte de la fabrication.

Surface mesurée (figure 2.2). C'est la surface détectée par les instruments de mesure à partir de la surface réelle.

IMPORTANT: Le degré de connaissance de l'état de surface est lié à la méthode de mesure choisie. La géométrie du palpeur de mesure de la figure 2.2 n'a pas pu détecter toutes les irrégularités de profil réel

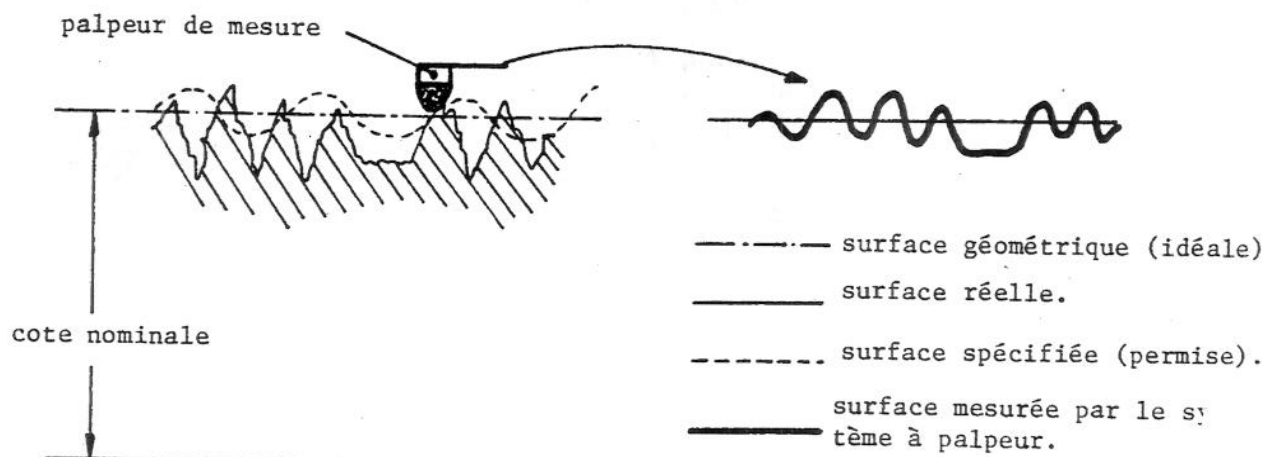


Figure 2.2: Les quatre surfaces associées à l'évaluation d'un état de surface. La surface géométrique peut être hors du profil réel.

### 2.3 Analyse d'une surface

Une surface est étudiée à partir de son profil, c'est-à-dire comme vue suivant une coupe plane perpendiculaire à la surface géométrique. Les défauts détectés sont classés en quatre ordres qui sont schématisés à la figure 2.3.

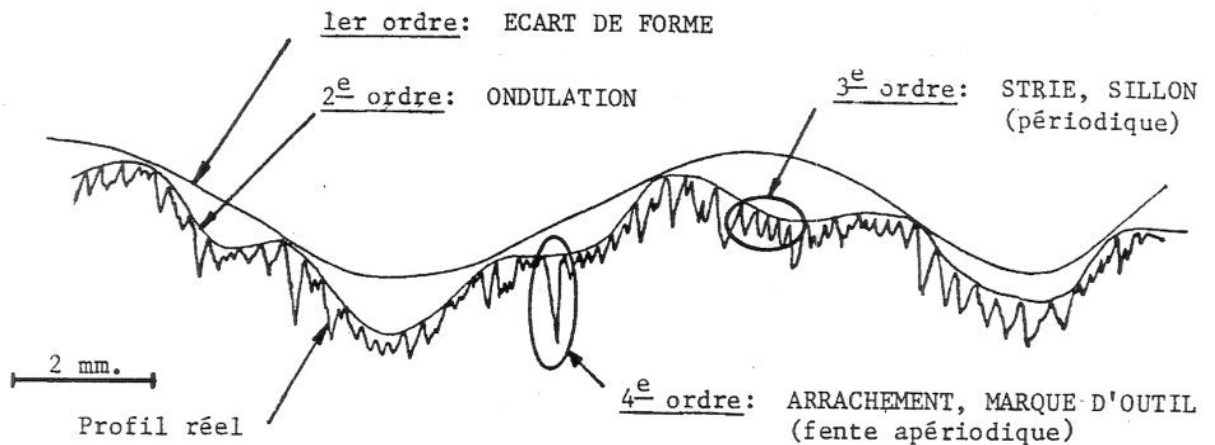


Figure 2.3: Les quatre ordres de défauts de surface

1<sup>er</sup> ordre: Ecart de forme. Ces défauts affectent la résistance au roulement ainsi que les étanchéités statique et dynamique. Aussi appelés rectitude, planéité, cylindricité, conicité ..., ces défauts seront développés dans le chapitre suivant.

2<sup>e</sup> ordre: Ondulation. Ces défauts proviennent généralement des traces d'avance d'outil et créent l'usure accélérée ainsi que le grippage. Il sont identifiés en traçant la ligne supérieure passant par la majorité des saillies. Les défauts suivants, de 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> ordre, représentent la RUGOSITE DE SURFACE:

3<sup>e</sup> ordre: Strie - Sillon. Ils proviennent de l'arrachement normal de la matière et affectent l'écoulement de fluides ainsi que l'étanchéité aux surfaces en contact.

4<sup>e</sup> ordre: Fente - Piqure. Ce type de défauts apériodiques provient d'arrachements prononcés de matière. Il a un grand effet sur la résistance de la pièce en fatigue.

## 2.4 Les critères d'état de surface

Les défauts de premier ordre seront étudiés au chapitre suivant intitulé "Tolérances géométriques". Les critères d'état de surface concernent donc les défauts du deuxième au quatrième ordre.

En réalité, il existe dix huit (18) critères de profil. Seulement les critères les plus couramment utilisés dans l'industrie seront présentés dans ce chapitre.

Les critères sont des valeurs dimensionnelles exprimées en micromètres ( $\mu\text{m}$ ) dans le système international et en micro-pouces ( $\mu\text{po}$ ) dans le système anglais. Ils sont classés en deux catégories: les critères physiques et statistiques.

### 2.4.a) Les critères physiques

#### 1. ONDULATION (défauts de deuxième ordre)

La figure 2.4 montre un profil seulement où les défauts de premier ordre ont été filtrés similairement à un signal électrique qui aurait été traité à travers un filtre passe haut.

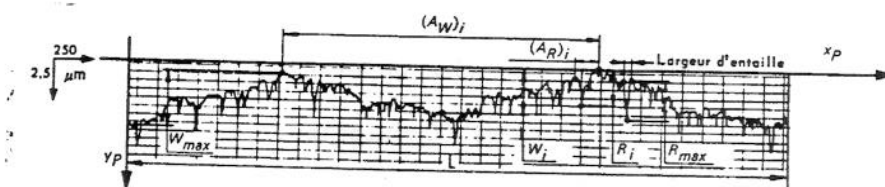


Figure 2.4: Profil où les écarts de forme (premier ordre) ont été filtrés.

La figure 2.5 montre le même profil où maintenant les défauts de troisième et quatrième ordre ont été filtrés. Seul le profil de deuxième ordre demeure.

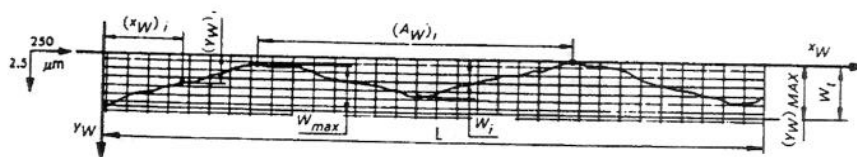


Figure 2.5: Les défauts d'ondulation ou défauts macrogéométriques sont isolés à partir d'un profil réel.

Sur cette figure apparaissent deux périodes d'ondulation d'amplitude  $W$  et de pas  $Aw$ . Sur un profil de  $n$  ondulations, deux critères physiques sont mesurés tels que:

Amplitude moyenne d'ondulation,  $W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} W_i$

Pas moyen d'ondulation,  $Aw = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Aw)_i$

## 2. RUGOSITE (défauts de troisième et quatrième ordre).

La figure 2.6 représente un profil de surface où les défauts de premier et deuxième ordres ont été retirés. Seuls les défauts des deux derniers ordres relatifs à la rugosité demeurent.

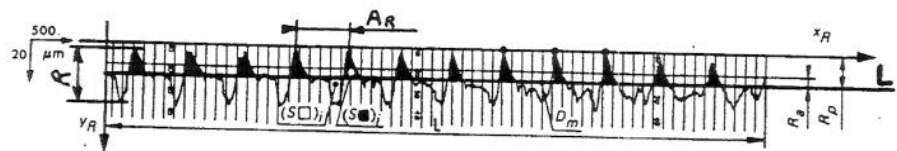


Figure 2.6 Mesure des défauts de rugosité ou défauts microgéométriques

Les trois critères physiques de rugosité les plus significatifs sont:

Amplitude moyenne de rugosité,  $R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} R_i$

Pas moyen de rugosité,  $Ar = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (A_R)_i$

Amplitude maximale de rugosité,  $R_{\max}$

De ces trois critères physiques,  $R$  est le plus fréquemment utilisé en industrie, il représente la profondeur moyenne entre deux crêtes consécutives.

### 2.4.b) Les critères statistiques

En réalité les critères statistiques sont au nombre de cinq. La majorité des appareils de mesure est toutefois équipée pour exprimer la rugosité de surface par:

l'écart moyen arithmétique,  $Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y_R - R_p| dx_R$

Ce critère est obtenu par rapport à la ligne moyenne  $L$  de la figure 2.6 qui répartit équitablement sur le profil les surfaces de matière des crêtes et les surfaces creusées par les sillons. Les termes composant l'expression de  $R_a$  sont indiqués sur le profil de rugosité de la figure 2.6.

En conclusion,  $R$  et  $R_a$  sont les deux critères les plus utilisés en industrie. Tous deux sont des indices de rugosité.

## 2.5 Spécifications d'un état de surface sur le dessin

Sur une pièce mécanique, les spécifications d'état de surface n'apparaissent que sur les surfaces jouant un rôle fonctionnel, exemple: surfaces de frottement, de glissement et de roulement, surfaces devant recevoir un dépôt électrolytique ou un revêtement de peinture. Les surfaces des pièces sollicitées à des forces cycliques doivent aussi répondre à des exigences de rugosité car la vie de la pièce est directement liée à l'état de surface.

Les spécifications d'état de surface englobent plusieurs informations qui sont regroupées autour d'un signe radical apposé sur la surface tel que tracé à la figure 2.7.

La figure 2.7(a) représente seulement les localisations 1, 2, 3, 4 et 5 autour du signe radical, l'attribution de chacune de ces localisations est défini dans le texte. Un exemple de spécification complète d'état de surface est repris à la figure 2.7(b).

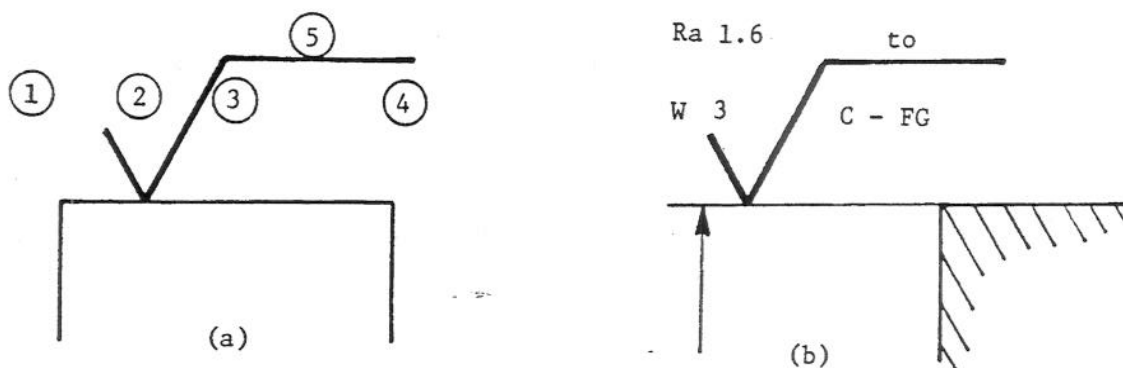


Figure 2.7: (a) Signe radical d'état de surface avec ses cinq localisations d'information

(b) Exemple de spécification complète d'état de surface apposé sur une ligne de cote.

Attributions des localisations mentionnés à la figure 2.7.a  
avec exemple à la figure 2.7.b

Localisation 1: (figure 2.7.a). Symbolisation(s) du ou des critères(s) d'état de surface demandé(s), exemple: Ra et W à la figure 2.7.b.

Localisation 2: (figure 2.7.a). Valeur(s) numérique(s) du ou des critères(s) demandé(s), exemple: 1.6 et 12  $\mu\text{m}$  ou  $\mu\text{po}$  \* suivant le système adopté dans le dessin. Les valeurs minimale et maximale des critères peuvent aussi être mentionnées au lieu de la valeur maximum seulement comme à la figure 2.7.b.

Localisation 3: (figure 2.7.a). Direction et type des stries d'usinage par rapport à la surface. Ces informations sont précisées à la figure 2.8. Le sens des stries d'usinage doit par exemple être dans le sens du déplacement des surfaces pour le cas de surfaces de frottement.

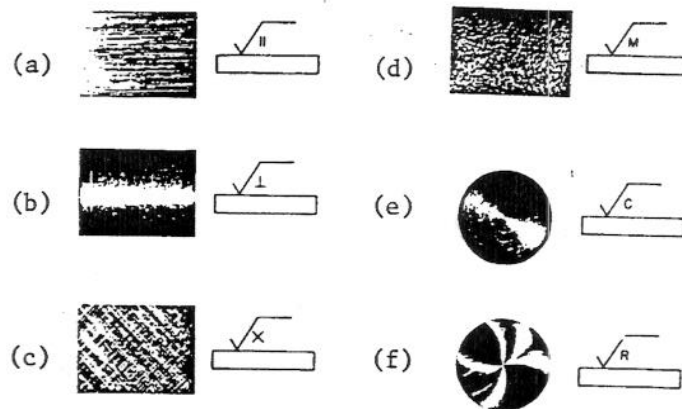
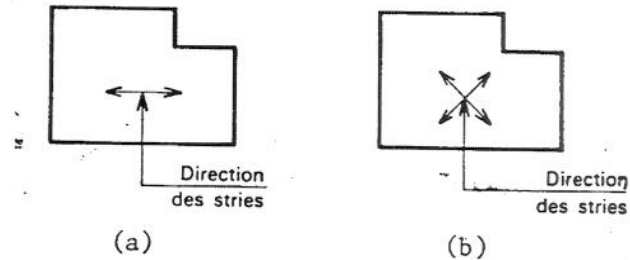


Figure 2.8 Six symboles de direction et de type des stries d'usinage décrites comme suit:

- (a) -parallèle à la ligne de projection du signe radical sur la surface.
- (b) -perpendiculaire à la ligne de projection du signe radical sur la surface.
- (c) -croisé, chaque direction étant à 45 degrés par rapport à la ligne de projection du signe radical.
- (d) -multidirectionnel.
- (e) -circulaire par rapport au centre de la surface.
- (f) -approximativement radial en partant du centre de la surface.

(\*) 1  $\mu\text{m}$   $\approx$  40  $\mu\text{po}$ ; 1mm  $\approx$  39/1000 po

La direction des stries peut aussi s'indiquer sur le dessin, sur la surface considérée même, par des flèches parallèles à la direction des stries désirée (figure 2.9). Cette représentation est plus explicite lorsqu'il n'y a pas risque d'équivoque dans le cas où le dessin est surchargé.



**Figure 2.9** Représentation de la direction des stries directement par des flèches sur la surface de la pièce dessinée

(a) -la flèche indique des stries parallèles.

(b) -les flèches indiquent des stries croisées.

Localisation 4: (figure 2.7.a). Fonction de la surface. Le tableau 2.1 présente la symbolisation des différentes fonctions de surface ainsi que l'écart moyen arithmétique ( $R_a$ ) et l'amplitude moyenne ( $R$ ) suggérés pour ces fonctions.



| Surface                    | Fonction                              | Symbole | Condition | Exemples d'application                                   | $R_a^*$    | $R^*$     |
|----------------------------|---------------------------------------|---------|-----------|--|------------|-----------|
| Avec déplacements relatifs | Frottement de glissement              | FG (1)  | Moyenne   | Coussinets-Portées d'arbres                              | 0,8        | 2         |
|                            |                                       |         | Difficile | Glissière de machines-outils                             | 0,4        | 1         |
|                            | Frottement de roulement               | FR (2)  | Moyenne   | Galets de roulement                                      | 0,4        | 1         |
|                            |                                       |         | Difficile | Chemin de roulement à billes                             | 0,02       | 0,06      |
|                            | Résistance au matage                  | RM      | Moyenne   | Cames de tours automatiques                              | 0,4        | 1         |
|                            |                                       |         | Difficile | Extrémités de tiges de poussée                           | 0,10       | 0,25      |
|                            | Frottement fluide                     | FF      | Moyenne   | Conduits d'alimentation                                  | 6,3        | 16        |
|                            |                                       |         | Difficile | Gicleurs   | 0,2        | 0,5       |
|                            | Étanchéité dynamique                  | ED (3)  | Moyenne   | Portées pour joints V. Ring (voir § 44-242)              | 0,8        | 2         |
|                            |                                       |         | Difficile | Portées pour joints à 4 lobes (voir § 44-26)             | 0,4        | 1         |
| Avec assemblage fixe       | Étanchéité statique                   | ES (3)  | Moyenne   | Surfaces d'étanchéité avec joint plat                    | 1,6        | 4         |
|                            |                                       |         | Difficile | Surfaces d'étanchéité glacées – sans joint               | 0,1        | 0,25      |
|                            | Assemblage fixe (contraintes faibles) | AF (4)  | Moyenne   | Portées, centrages de pièces fixes démontables           | 3,2        | 10        |
|                            |                                       |         | Difficile | Portées, et centrages précis                             | 1,6        | 4         |
|                            | Ajustement fixe avec contraintes      | AC      | Moyenne   | Portées de coussinets                                    | 1,6        | 4         |
|                            |                                       |         | Difficile | Portées de roulements                                    | 0,8        |           |
| Sans contrainte            | Adhérence (collage)                   | AD      |           | Fixation avec colle « Loctite Bloc-presse »              | 0,8 à 3,2  | 2 à 10    |
|                            | Dépôt électrolytique                  | DE      |           | Indiquer la rugosité exigée par la fonction, après dépôt | 0,1 à 3,2  | 0,25 à 10 |
|                            | Mesure                                | ME      | Moyenne   | Faces de calibres d'atelier                              | 0,1        | 0,25      |
| Avec contraintes           | Revêtement (peinture)                 | RE      |           |  | $\geq 3,2$ | $\geq 10$ |
|                            | Résistance aux efforts alternés       | EA      | Moyenne   | Alésages de chapes de vérin                              | 1,6        | 4         |
|                            |                                       |         | Difficile | Barres de torsion  | 0,8        | 2         |
|                            | Outils coupants (arête)               | OC      | Moyenne   | Outils en acier rapide                                   | 0,4        | 1         |
|                            |                                       |         | Difficile | Outils en carbure  | 0,2        | 0,5       |

(1) Denture d'engrenage voir § 47-5.

(2) Voir également le chapitre 40 concernant les roulements.

(3) Voir également le chapitre 44 concernant les joints d'étanchéité.

(4) Symbole non normalisé, rappeler sa signification sur chaque plan.

■ Relations approximatives :  $R_p \approx 0,4 R$ ;  $R \approx 5 \text{ à } 10 R_a$

■ Dans la plupart des cas les valeurs relatives des critères respectent les relations suivantes :  $R_{max} \leq 2R$ ;  $W \leq 2R_a$

■ L'intervalle de tolérance IT doit être supérieur à  $10 R_a$

**Tableau 2.1** Symbolisation des fonctions de surface avec leurs exemples d'application ainsi que leur rugosité suggérée.

Deux remarques intéressantes sont mentionnées au bas du tableau 2.1, soit:

- $R \approx 5 \text{ à } 10 R_a$
- l'intervalle de tolérance (IT) d'une cote où la surface considérée est impliquée doit être supérieure à dix fois  $R_a$  désiré.

Exemple: Si  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ , IT mini =  $32 \mu\text{m}$

Localisation 5: (figure 2.7.a) Procédé d'usinage proposé. Le tableau 2.2 donne les abréviations des différents procédés d'usinage, exemple: to, tournage à la figure 2.7.b.

| SYMBOLES NORMALISÉS DES PROCÉDÉS D'ÉLABORATION |     |                      |     | Moulage sable             | mos |
|--|-----|----------------------|-----|---------------------------|-----|
| Alésage  | al  | Fraisage en roulant  | frr | Perçage                   | pe  |
| Brochage                                       | br  | Forgeage             | fo  | Pierrage                  | pi  |
| Découpage                                      | de  | Galetage             | ga  | Polissage                 | po  |
| Dressage                                       | dr  | Grattage             | gr  | Rabotage                  | rb  |
| Électro-érosion                                | ée  | Grenailage angulaire | gna | Rectification cylindrique | rcc |
| Électro-formage                                | éf  | Grenailage sphérique | gns | Rectification plane       | rcp |
| Électro-polissage                              | ep  | Lamage               | lm  | Rodage                    | rd  |
| Estampage                                      | es  | Laminage à chaud     | lac | Sablage humide            | sah |
| Étincelage                                     | ei  | Laminage à froid     | laf | Sablage à sec             | sas |
| Étirage  | et  | Matricage            | ma  | Sciage                    | sc  |
| Filetage                                       | fl  | Meulage              | me  | Superfinition             | sf  |
| Fraisage en bout                               | frb | Moulage coquille     | moc | Tournage                  | to  |

Tableau 2.2 Symbolisation des différents procédés d'usinage.

## 2.6 Les appareils de mesure d'états de surface

Les développements technologiques des deux dernières décennies ont eu un grand impact sur les appareils de mesure d'état de surface. Cette section ne traite pas en détail tous les appareils existants, mais présente plutôt les appareils les plus utilisés dans l'industrie ainsi que quelques nouveaux principes appliqués à ce domaine de la métrologie.

AUCUN CRITERE DE PROFIL N'A DE SIGNIFICATION SANS LA SPECIFICATION DE LA TECHNIQUE DE MESURAGE TEL QUE LE MONTRE LA FIGURE 2.2.

### 2.6.a) Les échantillons viso-tactiles

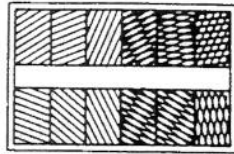


Figure 2.10 Plaquette d'échantillons viso-tactiles

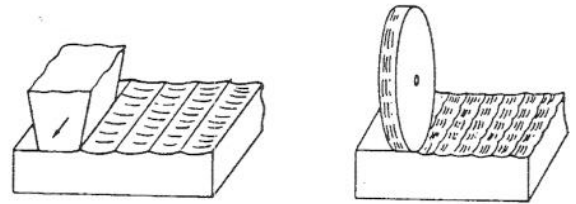


Figure 2.11 Schématisation de l'origine des stries d'usinage. Les échantillons viso-tactiles sont aussi obtenus.

La figure 2.10 montre une plaquette d'échantillons viso-tactiles obtenus par usinages contrôlés (figure 2.11). Les échantillons ont des rugosités graduelles bien identifiées (généralement par  $R_a$ ) suivant le procédé d'usinage: fraiseage, tournage, rectification.

Ces échantillons permettent une comparaison visuelle ou au toucher avec la pièce usinée. L'opérateur estime l'échantillon le plus proche de la surface usinée.

Cette méthode, peu coûteuse et rapide, est très flexible dans son application malgré qu'elle ne procure pas une mesure rigoureuse. Les surfaces à comparer peuvent aussi être étudiées à l'aide d'un microscope si la surface usinée est accessible.

### 2.6.b) Les appareils électroniques à palpeur

La figure 2.12 montre le principe de mesure de ces appareils. Un bras se déplace parallèlement à la surface à mesurer. Le bras possède soit un patin et un palpeur (figure 2.12.a), soit seulement un palpeur, dans ce cas le mouvement est guidé hors de la pièce à mesurer (figure 2.12.b).



Figure 2.12 Mouvements du bras palpeur sur une surface à mesurer.

La figure 2.13 détaille le principe de mesure du type de bras présenté à la figure 2.12.a. Le patin à fort rayon de courbure permet le filtrage des défauts de deuxième ordre (ondulation), seule la rugosité est interprétée par le capteur. Le capteur de déplacement du palpeur est incorporé dans le boîtier; il peut être :

- (figure 2.13.a) -Un mini convertisseur inductif (L.V.D.T.)
- (figure 2.13.b) -Une poutre piezo-électrique soumise en flexion.

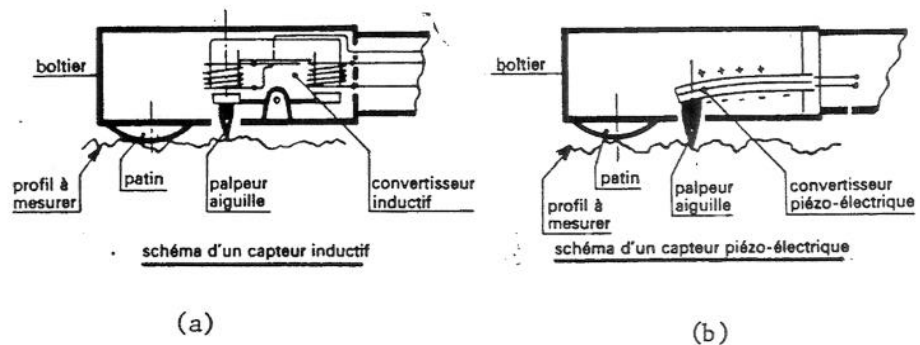


Figure 2.13 Détails du bras de lecture d'appareils à palpeur pour mesure de rugosité

- (a) avec capteur inductif
- (b) avec capteur piézo-électrique

Ces appareils sont très répandus dans l'industrie. Malgré que la géométrie du palpeur ne permette pas toujours de détecter les défauts de quatrième ordre, ils procurent plus d'informations que les échantillons viso-tactiles. Le profil rugueux peut être enregistré. Les capteurs, très sensibles, s'adaptent facilement à l'instrumentation électronique. Généralement les données sont fournies directement sous un critère ( $R_a$  ou  $R$ ) ou sous forme de charte circulaire tel que montré à la figure 2.14



Figure 2.14: Charte circulaire de rugosité où le même profil est tracé trois fois avec différents filtrages en fréquence.

#### 2.6.c) Les appareils optiques

Les appareils optiques permettent de détecter surtout les défauts de troisième et quatrième ordre. Ils sont plus rarement employés dans les industries de production car ils demandent beaucoup de soins et de précautions. Ce paragraphe décrit brièvement leur principe:

##### Le microscope à éclairage oblique



Figure 2.15: Le microscope à éclairage oblique.

## 2.6.d) Exploration des méthodes de mesure

Comme mentionné au début de cette section:

"Aucun critère de profil n'a de signification sans la spécification de la technologie de mesurage".

Le tableau 2.3 illustre schématiquement le classement des défauts par numéro d'ordre et des méthodes d'exploration énumérées ci-dessus.

| MODE DE PALPAGE | ÉCART DE FORME<br>1 <sup>er</sup> Ordre   | ONDULATION<br>2 <sup>e</sup> Ordre   | RUGOSITÉ   |   |
|-----------------|---|--|--|---|
|                 | direction générale du profil<br>profil anamorphosé  | direction générale du profil<br>ondulation<br>profil anamorphosé                       | STRIE, SILLON<br>3 <sup>e</sup> Ordre<br>Stries sillons direction générale du profil<br>profil anamorphosé | ARRACHEMENT, etc.<br>4 <sup>e</sup> Ordre<br>direction générale du profil<br>marque d'outil arrachement<br>profil anamorphosé |
| RECTILIGNE      | Appareillage classique<br>Machine à mesurer   |  |  |   |
|                 | Appareil à capteur à induction électromagnétique<br>● Palpeur-touche  |  |  |   |
|                 |   |  | Echantillons de comparaison visio-tactile  |   |
|                 |   |  | Appareil optique   |   |
|                 |   | Appareil à capteur à induction électromagnétique<br>● Palpeur-aiguille $L \leq 100$ mm |  |   |
|                 |   | Appareil à capteur à induction électromagnétique<br>● Palpeur-aiguille $L > 100$ mm    |  |   |
|                 |   |  | Appareil à capteur piézo-électrique<br>● Palpeur-aiguille  |   |
| CIRCULAIRE      | Appareil à capteur à induction électromagnétique mesurant les écarts par rapport à une circonférence de référence<br>● Palpeur-touche |  |  |   |
|                 |   |  | ● Palpeur-aiguille   |   |

Tableau 2.3: Classement des défauts de surface et des méthodes de mesure présentées dans le texte.

Deux lumières obliques de différente couleur éclairent la surface de la pièce en augmentant la qualité des détails de l'image. Cette image est observée à l'aide d'un microscope où des échelles de dimension sont incorporées sur la lentille.

#### Le microscope interférentiel



Figure 2.16: Image obtenue d'un microscope interférentiel.

Des franges lumineuses d'interférence éclairent une mince partie de la pièce qui est observée au microscope avec agrandissement (500 X).

#### Le réflectomètre:



Figure 2.17: Principe du réflectomètre

Cette méthode est basée sur la relation entre la rugosité de surface et la quantité de lumière incidente diffractée. Ce principe ne peut donner qu'une valeur moyenne (exemple:  $R_a$ ).

Le tableau 2.4 présente les plages de rugosité de surfaces brutes et usinées en fonction des procédés de fabrication. La rugosité est exprimée par l'écart moyen arithmétique  $R_a$  en  $\mu m$ .

Lors du choix des machines-outils, nous ferons référence à ce tableau.

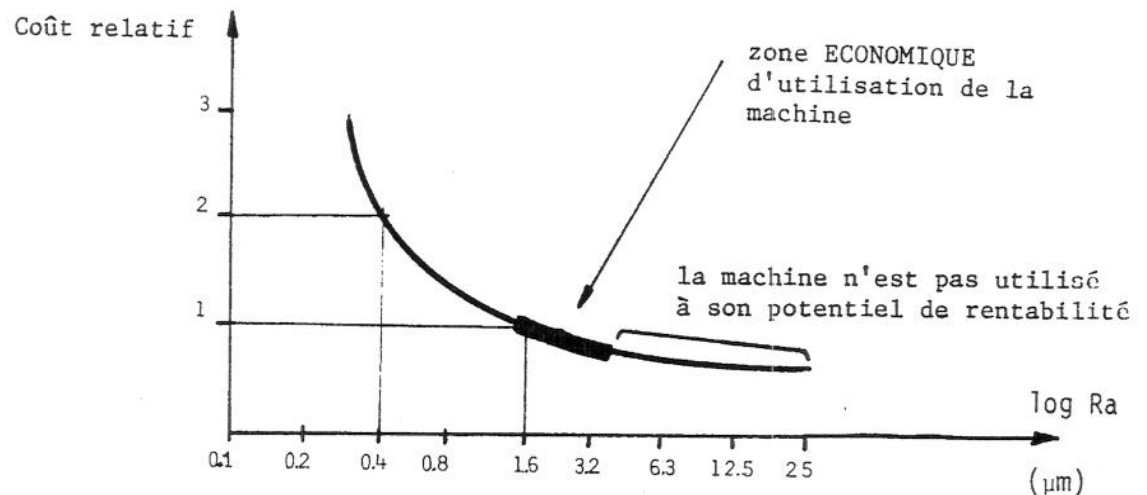
| Rugosité $R_a$ en micromètres (*) |                                 | 50                      | 25 | 12,5 | 6,3 | 3,2 | 1,6 | 0,8 | 0,4 | 0,2 | 0,1  | 0,05 | 0,025 |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|
| RUGOSITÉ DE SURFACES BRUTES       | Estampage                       |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Forgeage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Grenaillage                     |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Laminage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | filage - extrusion à chaud      |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | tréfilage - étirage à froid     |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Matricage                       |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | à chaud                         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | à froid                         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Moulage                         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
| RUGOSITÉ DE SURFACES USINÉES      | au sable                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | cire perdue - procédé Schaw...  |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | en coquille, par gravité        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | en coquille, sous pression      |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Sablage                         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Alésage                         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | outil acier rapide              |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | outil carbure ou diamant        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | à l'aloisoir                    |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Brochage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Brunissage                      |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Découpage (à la presse)         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Découpage fin (à la presse)     |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Électro-érosion                 |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Fraisage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | outil acier rapide              |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | en bout                         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Fraisage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | outil acier rapide              |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | en roulant                      |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | outil carbure                   |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Galetage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Grattage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Limage                          |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | (traités croisés ou parallèles) |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | à main                          |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Meulage                         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | au disque                       |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | électrolytique                  |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Mortaisage                      |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Oxycoupage                      |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Perçage au foret                |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Polissage                       |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | mécanique                       |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | électrolytique                  |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Rabotage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | cylindrique                     |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Rectification                   |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | plane                           |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | diamant                         |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Rodage                          |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | à la pierre                     |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | au rodoir                       |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Sciage                          |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Superfinition                   |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Taillage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | fraise module                   |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | fraise mère                     |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | Tournage                        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | outil acier rapide              |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   | outil carbure ou diamant        |                         |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
| Rugosité $R$ en micromètres       |                                 | 160                     | 80 | 40   | 16  | 10  | 4   | 2   | 1   | 0,5 | 0,25 | 0,12 | 0,06  |
|                                   |                                 | Valeurs usuelles        |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |
|                                   |                                 | Valeurs exceptionnelles |    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |       |

Tableau 2.4: Procédés de fabrication et états de surface.

(\*)  $1 \mu m \approx 40 \mu po$



Pour un même procédé d'usinage, les états de surface à obtenir peuvent être plus ou moins coûteux à cause des soins qu'ils exigent. La figure 2.18 ci-dessous, montre la variation du prix relatif en fonction de la rugosité  $R_a$  à obtenir en fraisage en bout avec outil au carbure.



**Figure 2.18:** Coûts relatifs approximatifs d'un usinage en fonction du  $R_a$  de rugosité demandé en fraisage en bout avec outil en carbure. La rugosité ( $1.6 < R_a < 3.2 \mu m$ ) est la rugosité économique car la machine peut l'obtenir en fonctionnement normal.

Le tableau 2.4 contient beaucoup d'informations qui seront très utiles pour le choix des procédés d'usinage. A cette étape du cours, il est intéressant de porter son attention sur certaines remarques:

1. Avec les procédés d'usinages conventionnels comme le fraisage et le tournage, il est possible d'obtenir directement des rugosités moyennes de  $R_a = 3.2$  à  $1.6 \mu m$  dépendant de l'outil choisi.
2. Si une rugosité avec  $R_a = 0.8$  à  $0.4 \mu m$  est à obtenir, il faudra faire appel à de la rectification après les usinages de tournage ou de fraisage car la rectification ne permet pas de retirer beaucoup de matière. Ces tournage ou fraisage n'auront pas à donner un bon état de surface car cet état de surface ne sera pas final. Pour cette raison, il est suggéré de travailler ECONOMIQUEMENT lorsqu'un procédé d'usinage n'est pas final.



## CHAPITRE III

### TOLERANCES GEOMETRIQUES

#### 3.1 Introduction

Le fonctionnement d'une pièce mécanique peut être affecté par quatre défauts majeurs qui ne peuvent pas être totalement évités mais au moins tolérancés. Ces défauts appliqués à un cas particulier sont présentés au tableau 3.1.

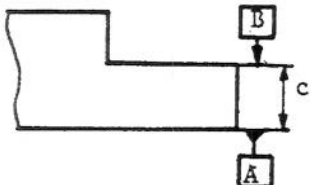
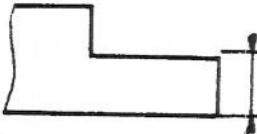
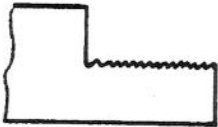

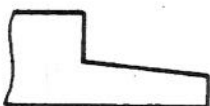
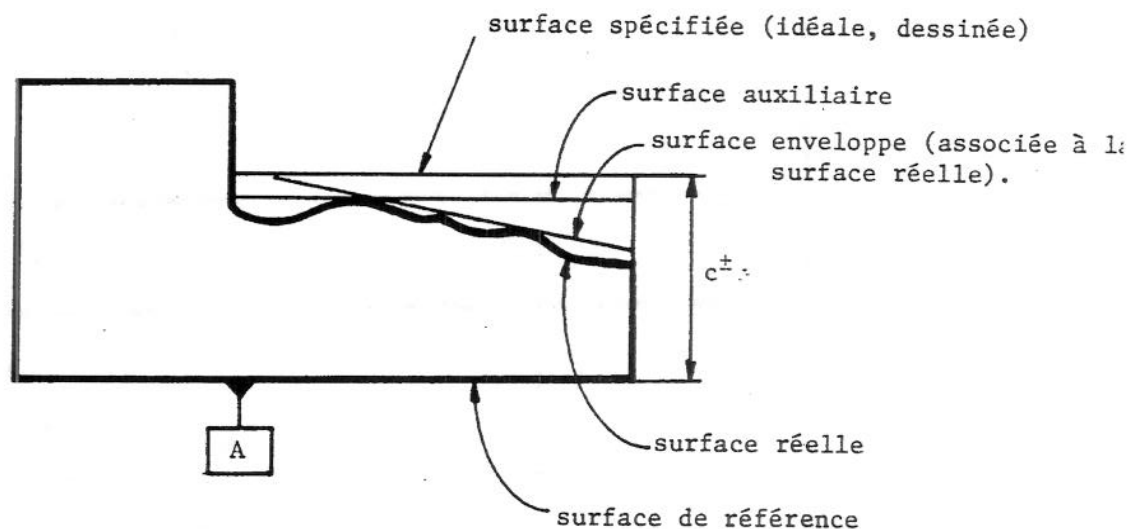
|  | <p><u>Exigences fonctionnelles:</u> La surface B doit être plane, lisse et parallèle à la surface de référence A en respectant une cote c.</p> |  |
|---|--|--|
| <u>Défauts</u>  | <u>Schémas des défauts</u>   | <u>Tolérances à fixer</u>                          |
| Ecart de la cote c  |    | Tolérance dimensionnelle (chapitre # 1)            |
| Défaut d'état de surface  |    | Critères de rugosité:<br>Ra, R max<br>(chapitre 2) |
| Défaut de forme   |    | Tolérance de forme<br>(chapitre 3)                 |
| Défaut de position par rapport à la surface A                                     |    | Tolérance de position<br>(chapitre 3)              |

Tableau 3.1: Les quatre défauts majeurs que peut comporter la surface d'une pièce mécanique, ici la face B.

Les tolérances géométriques limitent les écarts admissibles de forme, d'orientation, de position et de battement d'un élément mécanique. Ce chapitre présente chacune d'elles dans des paragraphes distincts.

### 3.2 Terminologie

Avant de décrire chaque défaut géométrique en détail, certaines définitions doivent être apportées. La figure 3.1 reprend la pièce du tableau 3.1 avec ses défauts géométriques à partir desquels pourront être définis:



**Figure 3.1:** Présentation des surfaces nécessaires à la définition des tolérances géométriques.

\*La surface de référence, c'est la surface A de la figure par rapport à laquelle sont basées les cotations dimensionnelle et géométrique de la surface à étudier. Noter que la surface de référence est désignée par un triangle noirci.

\*La surface réelle, c'est la surface de fabrication avec ses défauts dimensionnels et géométriques.

\*La surface spécifiée, c'est la surface plane qui figure sur le dessin de définition de la pièce. Elle est théorique et bien sûr sans défaut. Dans ce cas-ci, elle est parallèle à la référence A en respectant la cote  $c$  tolérancée.

\*La surface auxiliaire, c'est la surface plane parallèle à la surface spécifiée et touchant la première crête du côté libre de matière de la surface réelle. Elle sera utile à la définition des tolérances de position.

\*La surface enveloppe, c'est la surface plane qui touche la surface réelle, sans la couper, du côté libre de matière. C'est également le plan parfait qui reposerait sur les crêtes saillantes de la surface réelle. Elle sera utile à la définition des tolérances de forme.

Cette terminologie, appliquée ici à des surfaces, s'emploie aussi bien à des lignes, des axes, des cylindres et des cônes qui seront appelés dans le texte ELEMENTS.

### 3.3 Indication des éléments sur dessin

Quel que soit le type d'éléments (surface, cylindre, ...), il existe les éléments de référence et les éléments de tolérances qui doivent être clairement identifiés sur un dessin de définition.

#### 1- Les éléments de référence

Les éléments de référence comme sur la surface A de la figure 3.1 sont indiqués par un triangle noir. La figure 3.2.a montre la désignation d'une surface, d'un cylindre et d'un axe de référence.

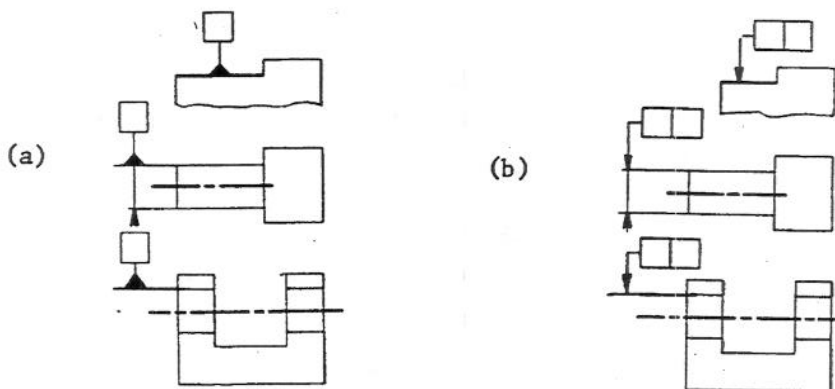
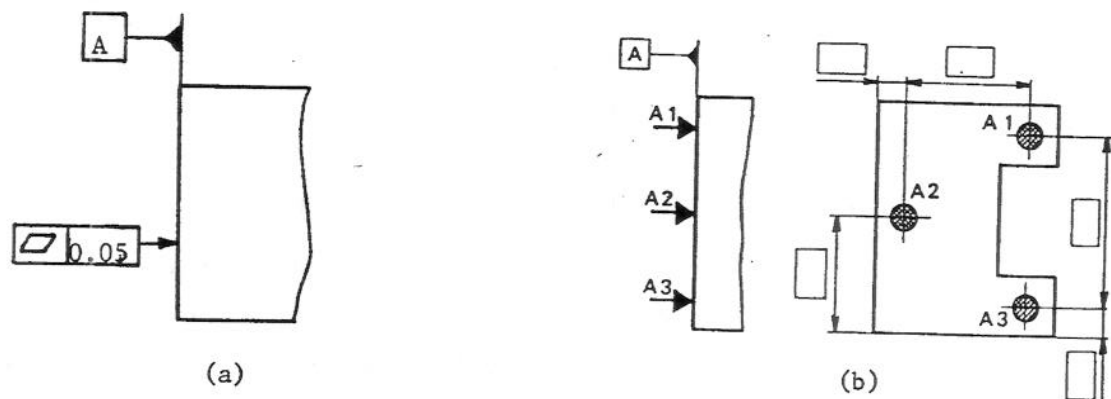


Figure 3.2: Indication de surface, de cylindre et d'axe de référence (a) et à tolérancer (b).

Il est évident que les défauts de forme de l'élément de référence doivent être négligeables par rapport aux défauts à contrôler sur le deuxième élément. C'est pourquoi il est nécessaire:

- de préciser une tolérance de forme sur la surface de référence. Exemple de la figure 3.3.a: une tolérance de planéité 0.05 mm est exigée sur la surface A de référence.
- d'indiquer la position des points qui définiront géométriquement l'élément de référence. Exemple de la figure 3.3.b: trois points localisés A1, A2 et A3 définissent la surface de référence A reproductible d'une pièce à l'autre.



**Figure 3.3:** Contrôle du défaut de forme d'un élément de référence:

- (a) Indication d'une tolérance de forme  
(b) Localisation de trois points.

## 2- Les éléments tolérancés

Les éléments tolérancés sont indiqués par une flèche comme l'indique la figure 3.2.b.

## 3- Applications

Une pièce mécanique dessinée comprend des éléments fonctionnels qui sont tolérancés géométriquement par rapport à des éléments de référence. Ces deux types d'éléments ainsi que leur correspondance doivent être clairement identifiés sur le dessin. Les figures 3.4 et 3.5 illustrent deux exemples simples de notation. La figure 3.4 reprend deux façons de noter la perpendicularité d'une face par rapport à une seconde, A.

La figure 3.5 montre la notation adoptée sur une pièce de révolution, le cylindre central doit être concentrique à l'axe de référence défini par les deux diamètres extrêmes A et B. Les critères de perpendicularité et concentricité seront mieux définis dans les sections à venir.

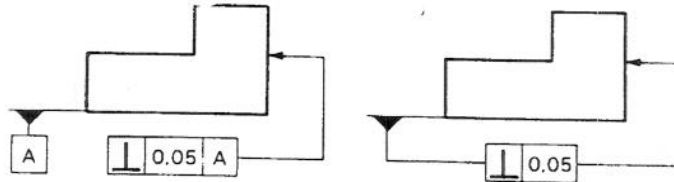


Figure 3.4: Notations de perpendicularité entre deux faces. La surface A est la face de référence.

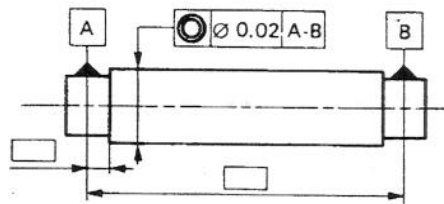

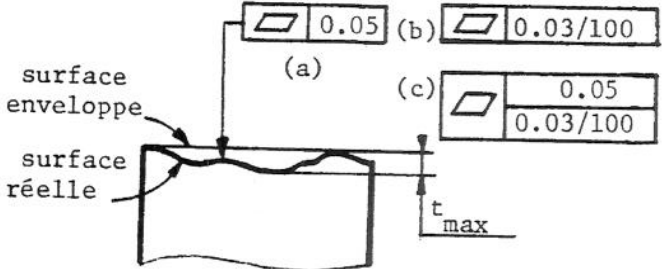

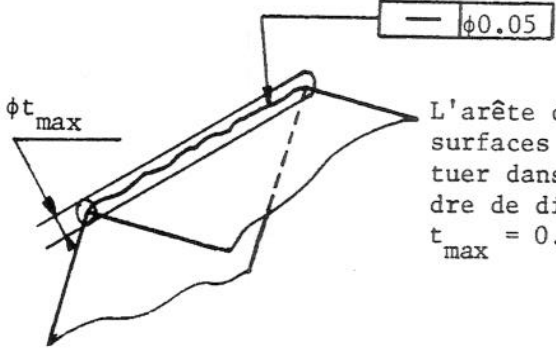
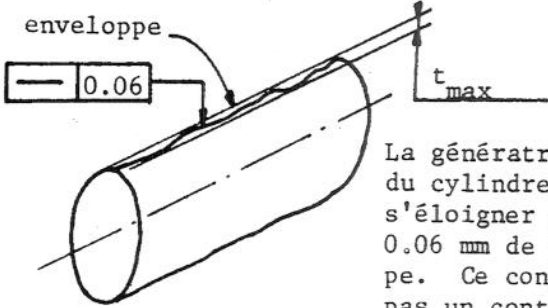



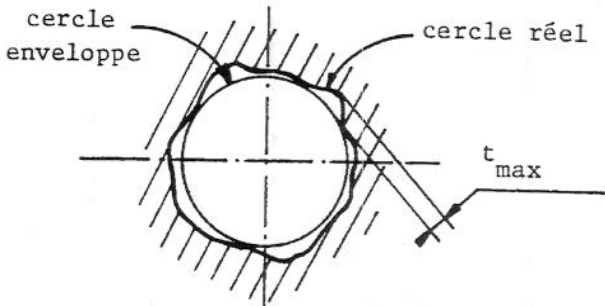
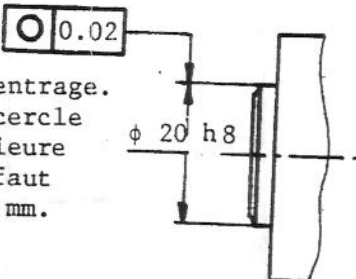

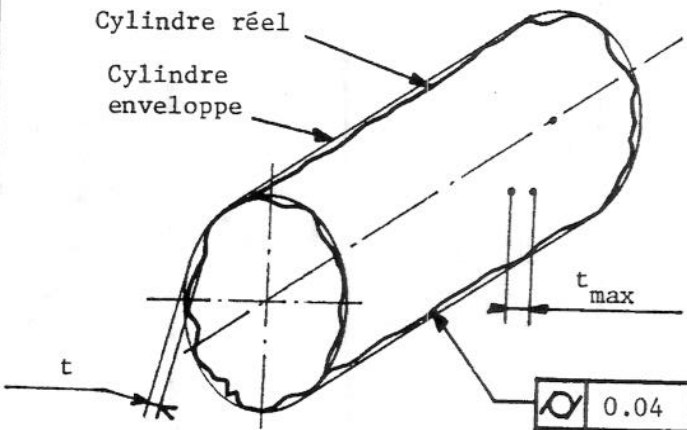
Figure 3.5: Notation de concentricité. La référence est l'axe défini par les deux diamètres extrêmes A et B.


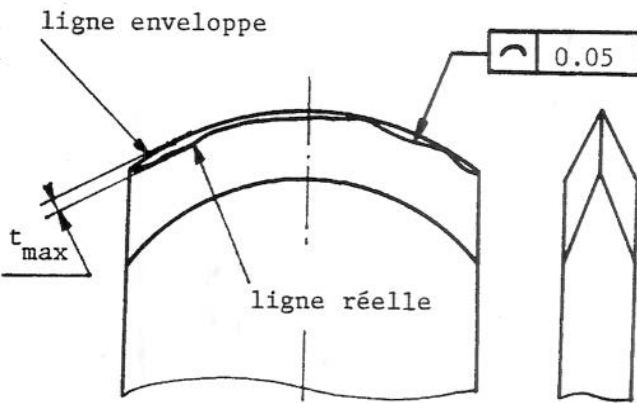

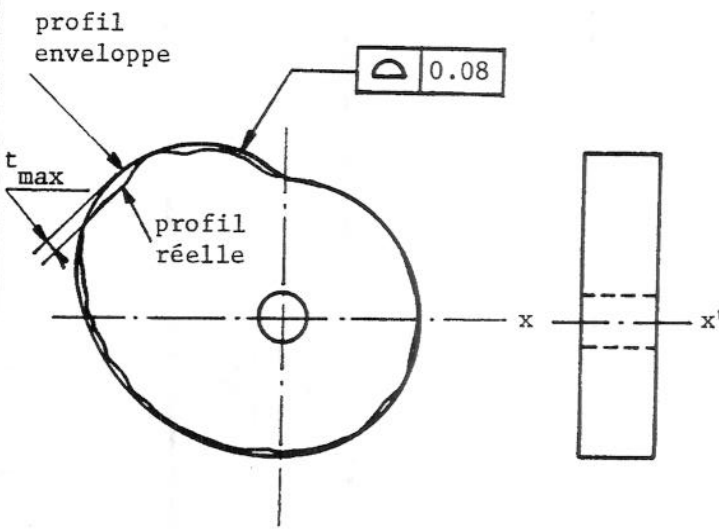
### 3.4 Les tolérances de forme

Ces tolérances de forme considérant seulement la forme des éléments, aucun élément de référence ne sera impliqué dans leur interprétation. Cette interprétation se fera entre l'élément réel et l'élément d'enveloppe. Le tableau ci-dessous présente en détail les six tolérances de forme où dans tous les cas, t max est la tolérance maximale permise. tmax est exprimée en millimètres dans le système international et en pouces dans le système anglais.

| Critères         | Symboles  | Applications et significations   |
|------------------|---|--|
| <u>Planéité</u>  |    | <p><u>Ce critère s'applique à une surface</u></p>  <p>(a) <math>t_{\max}</math> permis = 0.05 mm.</p> <p>(b) <math>t_{\max}</math> permis = 0.03 sur toute surface carrée de 100 mm de côté</p> <p>(c) les deux tolérances a et b sont groupées.</p>   |
| <u>Rectitude</u> |  | <p><u>Ce critère s'applique à une droite</u></p> <p><u>1<sup>er</sup> cas</u> = Arête entre deux surfaces</p>  <p>L'arête des deux surfaces doit se situer dans un cylindre de diamètre <math>t_{\max} = 0.05</math></p> <p><u>2<sup>e</sup> cas</u> = Génératrice d'un cylindre</p>  <p>La génératrice réelle du cylindre ne doit pas s'éloigner de plus de 0.06 mm de son enveloppe. Ce contrôle n'est pas un contrôle total du cylindre</p> |



| Critères            | Symboles  | Applications et significations  |
|---------------------|---|---|
| <u>Circularité</u>  |    | <p data-bbox="787 373 1481 409"><u>Ce critère s'applique à une section circulaire</u></p> <div data-bbox="799 415 1399 718">  </div> <p data-bbox="771 724 1481 814">La géométrie réelle du trou ne doit pas s'éloigner de plus de <math>t_{\max}</math> du cercle enveloppe interne.</p> <p data-bbox="771 861 896 892"><u>Exemple:</u></p> <p data-bbox="771 903 1177 1066">Diamètre court de centrage. Dans ce cas-ci, le cercle enveloppe est extérieure au cercle réel. Défaut permis, <math>t_{\max} = 0.02</math> mm.</p> <div data-bbox="1068 840 1421 1117">  </div> |
| <u>Cylindricité</u> |  | <p data-bbox="824 1161 1360 1197"><u>Ce critère s'applique à un cylindre</u></p> <div data-bbox="734 1249 1416 1675">  </div> <p data-bbox="738 1711 1458 1879">Le cylindre réel ne doit pas s'éloigner de plus de <math>t_{\max}</math> (0.04 mm) du cylindre enveloppe extérieur. La valeur <math>t_{\max}</math> peut se situer radialement n'importe où sur le cylindre.</p>  |

| Critères                            | Symboles  | Applications et significations  |
|-------------------------------------|---|---|
| <u>Profil de ligne quelconque</u>   |    | <p><u>Ce critère s'applique à une ligne quelconque</u></p>  <p><u>Exemple:</u> Arête courbe délimitée par deux surfaces.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>la ligne enveloppe est tracée suivant le rayon spécifié sur le dessin.</li> <li><math>t_{\max} = 0.05 \text{ mm}</math>.</li> </ul> |
| <u>Profil de surface quelconque</u> |  | <p><u>Ce critère s'applique à une surface quelconque</u></p>  <p><u>Exemple:</u> Profil d'une came tournant autour de l'axe <math>x \ x'</math>. Le profil réel ne doit pas s'éloigner de plus de 0.08 du profil enveloppe.</p>   |

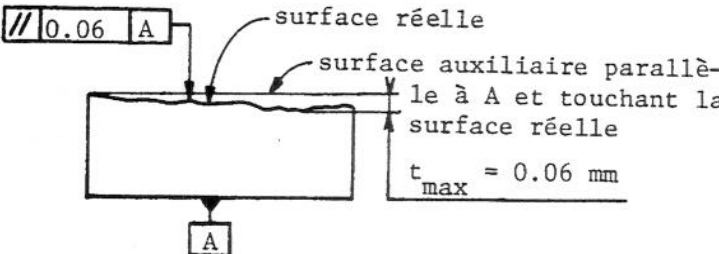
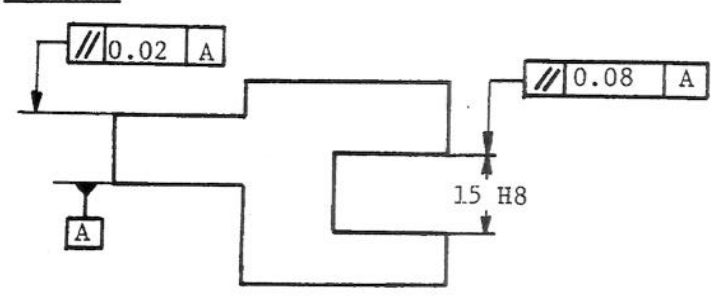
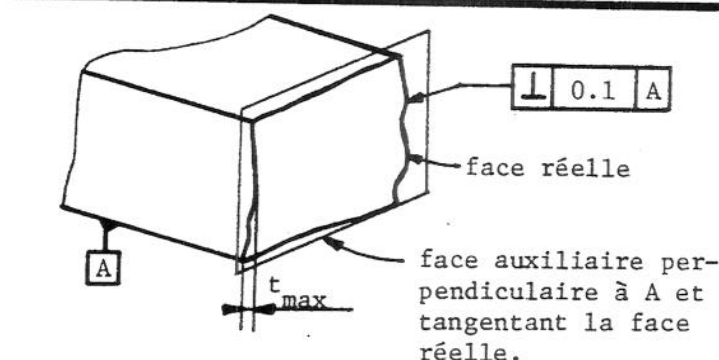
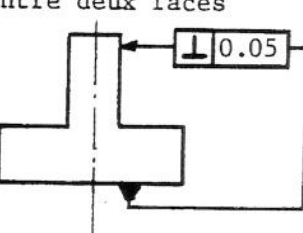
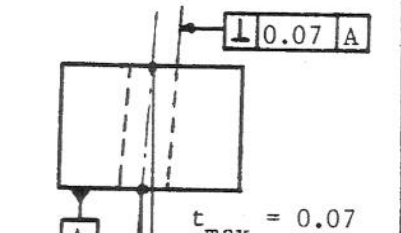
### 3.5 Les tolérances associées: d'orientation, de position et de battement.

Contrairement aux tolérances de forme qui sont destinées strictement à tolérer un seul élément (surface, cylindre, ...), les tolérances associées sont employées pour situer un élément par rapport à un second élément appelé, élément de référence. Deux éléments seront donc impliqués, soit:

- l'élément de référence
- l'élément auxiliaire qui est un élément fictif qui remplit exactement l'orientation ou le positionnement désiré en venant toucher la surface réelle.

Tout comme les tolérances de forme, les tolérances associées sont présentées en détail dans les tableaux suivants où  $t_{\max}$  est toujours la tolérance maximale permise exprimée en mm ou po.

## TOLERANCES D'ORIENTATION

| Critères                | Symboles | Applications et significations  |
|-------------------------|----------|---|
| <u>Parallélisme</u>     | //       |  <p>La surface réelle ne doit pas s'éloigner de plus de 0.06 mm. de la surface auxiliaire.</p> <p>Exemple:</p>   |
| <u>Perpendicularité</u> | ⊥        |  <p>La face réelle ne doit pas s'éloigner de plus de 0.1 mm. de la face auxiliaire telle que définie.</p> <p>Exemple:</p> <p>entre une face - un axe</p>  <p>entre deux faces</p>  |


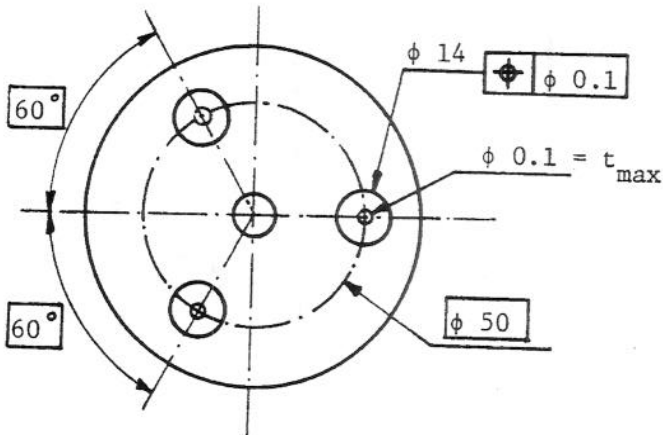

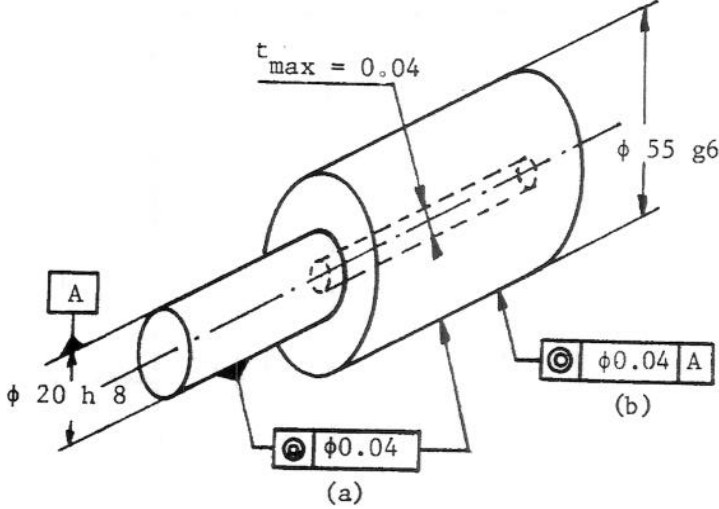
## TOLERANCES D'ORIENTATION

| Critères           | Symboles | Applications et significations   |
|--------------------|----------|--|
| <u>Inclinaison</u> |          | <p>surface auxiliaire à 45 degrés de A et touchant la surface réelle</p> <p>surface réelle</p> <p>t max</p> <p>45°</p> <p>A</p> <p>En tout point, la surface réelle ne doit pas s'éloigner plus de t max de la surface auxiliaire qui est inclinée de la valeur de la cote angulaire encadrée.</p> <p>Notation:</p> <p>45°</p> <p>P</p> <p> 0.04 P</p> |




## TOLERANCES DE POSITION

|                     |  |   |
|---------------------|--|---|
| <u>Localisation</u> |  | <p>Exemple # 1:</p> <p>20</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>30</p> <p>φ12</p> <p>φ 0.1</p> <p>tmax = 0.1</p> <p>A</p> <p>L'axe du trou doit être compris dans une bande de 0.1 mm. centrée sur la cote nominale encadrée.</p> <p>Exemple # 2:</p> <p>20</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>30</p> <p>φ 16 H7</p> <p>φ 0.1</p> <p>L'axe du trou φ 16 doit être compris dans un cylindre de φ 0.1 centré à la position théorique donnée par les cotes nominales encadrées.</p> |
|---------------------|--|---|

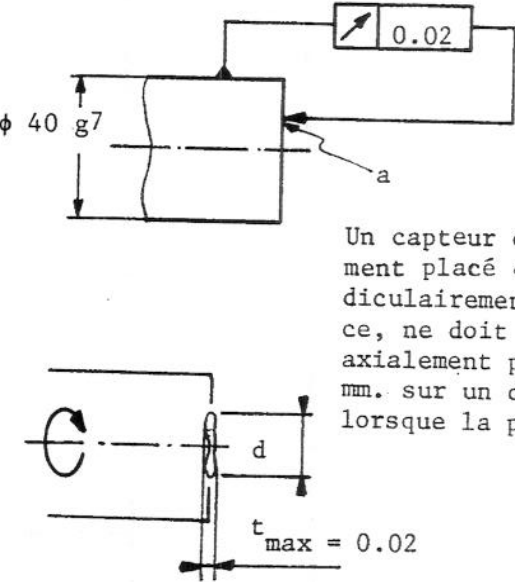
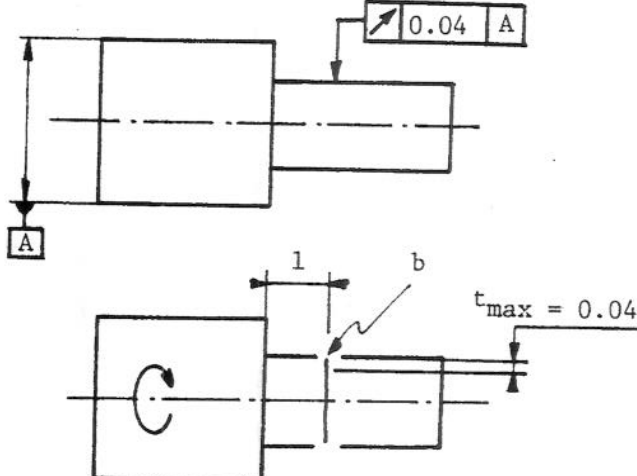
## TOLERANCES DE POSITION

| Critères                               | Symboles  | Applications et significations   |
|--|---|--|
| <p><u>Localisation</u><br/>(suite)</p> |    | <p><u>Exemple # 3:</u></p>  <p>L'axe de chacun des trois trous <math>\phi 14</math> doit être compris dans une zone cylindrique de <math>\phi 0.1</math> dont l'axe est la position spécifiée par les cotes nominales encadrées.</p> <p><u>Remarque:</u> <math>\phi 50</math> tolérancé = <math>\phi 50^{\pm 0.1}</math></p>                                 |
| <p><u>Coaxialité</u></p>               |  |  <p>(a) et (b), deux notations possibles.</p> <p>L'axe du cylindre <math>\phi 55</math> g6 doit être compris dans le cylindre en pointillé de <math>\phi 0.04</math> coaxial avec le cylindre de référence <math>\phi 20</math> h 8.</p> <p>L'axe de référence peut aussi être défini par deux cylindres A et B éloignés comme montré à la figure 3.5.</p> |


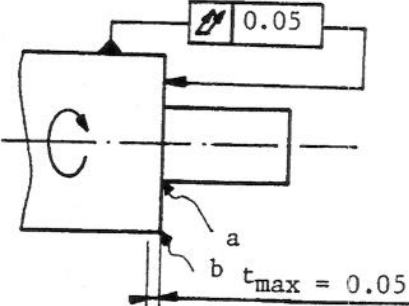
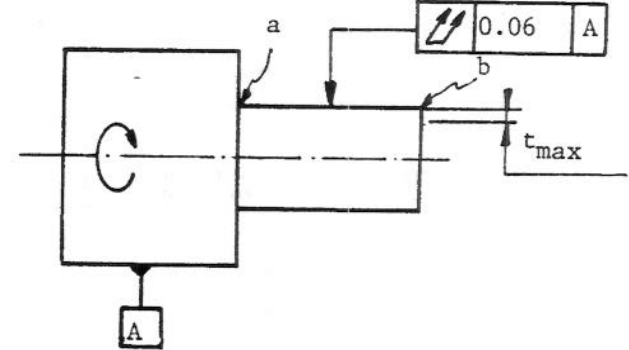
## TOLERANCES DE POSITION

| Critères | Symboles  | Applications et signification  |
|----------|---|--|
| Symétrie |  | <p><u>Exemple # 1:</u></p> <p><math>t_{\max} = 0.06</math></p> <p>16 H 8  0.06 A</p> <p>Le plan médian de la rainure 16 H 8 doit être compris entre deux plans parallèles distants de 0.06 et disposés symétriquement par rapport au plan médian de A (cote 40 g5).</p> |
|          |   | <p><u>Exemple # 2:</u></p> <p>12H7  0.04</p> <p>40</p> <p><math>\phi 48</math> g6</p> <p>Le plan médian de la rainure 12H7 doit être à <math>\pm 0.02</math> du plan médian du cylindre <math>\phi 48</math> g6.</p>  |

# TOLERANCES DE BATTEMENT

| Critères                | Symboles | Applications et signification  |
|-------------------------|----------|--|
| <u>Battement simple</u> |          | <p><u>Ce critère s'applique aux diamètres de révolution.</u></p> <p><u>Cas # 1: Battement simple axial</u></p>  <p>Un capteur de déplacement placé en a, perpendiculairement à la surface, ne doit pas mesurer axialement plus de 0.02 mm. sur un diamètre d lorsque la pièce tourne.</p> |
|                         |          | <p><u>Cas # 2: Battement simple radial</u></p>  <p>Un capteur de déplacement posé en b, perpendiculairement au cylindre, ne doit pas mesurer radialement plus de 0.04 mm. lorsque la pièce, prise en A, tourne.</p>  |



| Critères               | Symboles  | Applications et significations   |
|------------------------|---|--|
| <u>Battement total</u> |  | <p>Ce critère s'applique aux surfaces de révolution (cylindre et cône)</p> <p><u>Cas # 1:</u> Battement total axial</p>  <p>Un capteur de déplacement qui se déplace entre a et b perpendiculairement à la surface à vérifier ne doit pas mesurer axialement plus de 0.05 mm. lorsque la pièce prise sur le grand diamètre tourne.</p> |
|                        |   | <p><u>Cas # 2:</u> Battement total radial</p>  <p>Un capteur de déplacement qui se déplace entre a et b ne doit pas mesurer radialement plus de 0.06 mm. lorsque la pièce de révolution tourne par rapport à la surface de référence A.</p>  |

| Symboles et caractéristiques à tolérer |                     | Exemples d'application   |  |   |
|--|---------------------|--------------------------|--|---|
|  |                     | Indication sur le dessin | Zone de tolérance  | Interprétation  |
| Eléments isolés                        | Tolérances de forme |                          | Rectitude d'une ligne ou d'un axe  | <br>L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de la tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de 0,03 de diamètre.   |
|  |                     |                          | Planéité d'une surface   | <br>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05.  |
|  |                     |                          | Circularité d'un disque, d'un cylindre, d'un cône, etc.  | <br>Le pourtour de chaque section droite doit être compris dans une couronne circulaire de largeur 0,02.  |
|  |                     |                          | Cylindricité   | <br>La surface considérée doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de 0,05.   |
| Eléments isolés ou associés            |                     |                          | Forme d'une ligne quelconque (profil ou contour)   | <br>Dans chaque section parallèle au plan de la projection, le profil considéré doit être compris entre deux lignes enveloppes des cercles de diamètre 0,08 dont les centres sont situés sur une ligne ayant le profil géométrique correct.   |
|  |                     |                          | Forme d'une surface quelconque   | <br>La surface considérée doit être comprise entre deux surfaces enveloppes des sphères de diamètre 0,03 dont les centres sont situés sur une surface ayant la forme géométrique.   |
| Tolérances d'orientation               |                     |                          | Parallélisme d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite de référence ou un plan de référence. | <br>L'axe supérieur doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,1 parallèle à l'axe inférieur A (droite de référence).  |
|  |                     |                          | Perpendicularité d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence.          | <br>L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris entre deux droites parallèles distantes de 0,05 perpendiculaires au plan de référence et se trouvant dans le plan indiqué sur le dessin.  |
|  |                     |                          | Inclinaison d'une ligne (axe) ou d'une surface par rapport à une droite ou un plan de référence.               | <br>L'axe du trou doit être compris entre deux droites parallèles distantes de t = 0,1 et formant avec le plan de référence un angle de 60°.  |
| Tolérances de position                 | E éléments associés |                          | Localisation de lignes, axes ou surfaces entre eux ou par rapport à un ou plusieurs éléments.                  | <br>L'axe du trou doit être compris dans une zone cylindrique d'un diamètre de 0,05 dont l'axe est dans la position théorique spécifiée de la ligne.  |
|  |                     |                          | Coaxialité (concentricité) d'un axe ou d'un point par rapport à un axe ou un point de référence.               | <br>L'axe du cylindre dont la cote est reliée au cadre de tolérance doit être compris dans une zone cylindrique de diamètre 0,03 coaxiale à l'axe commun de référence A.  |
|  |                     |                          | Symétrie d'un plan médian ou d'une ligne médiane (axe) par rapport à une droite ou un plan de référence.       | <br>Le plan médian de la rainure doit être compris entre deux plans parallèles distants de 0,06 et disposés symétriquement par rapport au plan médian de l'élément de référence A.  |
| Tolérances de battement                |                     |                          | Battement simple d'un élément sur l'axe de révolution.   | <br>Le battement simple radial ne doit pas dépasser 0,02 dans chaque plan de mesure pendant une révolution complète autour de l'axe de référence A - B.   |
|  |                     |                          | Battement total d'un élément sur l'axe de révolution.  | <br>Le battement total radial ne doit pas dépasser 0,1 en chaque point de la surface spécifiée durant plusieurs révolutions autour de l'axe de référence A - B et avec un mouvement axial relatif entre la pièce et l'instrument de mesure. Le mouvement doit être guidé le long d'une ligne de contour de forme théoriquement parfaite étant en position correcte de l'axe de référence. |

Tableau 3.2: Tableau résumé des tolérances de forme et associées

### 3.6 Analyse fonctionnelle et attribution des tolérances géométriques

Les paragraphes précédents ont présentés les différentes tolérances de forme, de position et d'orientation disponibles. Ces tolérances, tout comme les tolérances dimensionnelles, doivent être appliquées judicieusement sur des pièces mécaniques qui assurent une fonction précise. Le type et la valeur des tolérances découleront de l'étude fonctionnelle du système mécanique où ces pièces sont impliquées. Trois exemples d'analyse fonctionnelle sont présentés en détail ci-dessous:

#### EXEMPLE # 1: Butée réglable

Description du système: (figure 3.6).

Un dessin d'ensemble de la butée réglable est rapporté à la figure 3.6. La butée est composée du corps 1 qui est bloqué sur la base 2 par l'écrou 3. A l'intérieur du corps 1, la pièce butée 4 peut seulement glisser axialement car l'ergot 5 interdit toute rotation. Toujours sur le corps 1, est installée la vis 6 qui peut tourner librement, mais ne peut pas se déplacer axialement à cause de sa géométrie et de l'écrou 7 monté à l'arrière de la vis. La vis 6 se visse dans la pièce butée 4. Toute rotation de la vis 6 va donc créer un mouvement axial de la pièce butée 4 puisque ces deux pièces se vissent l'une dans l'autre.

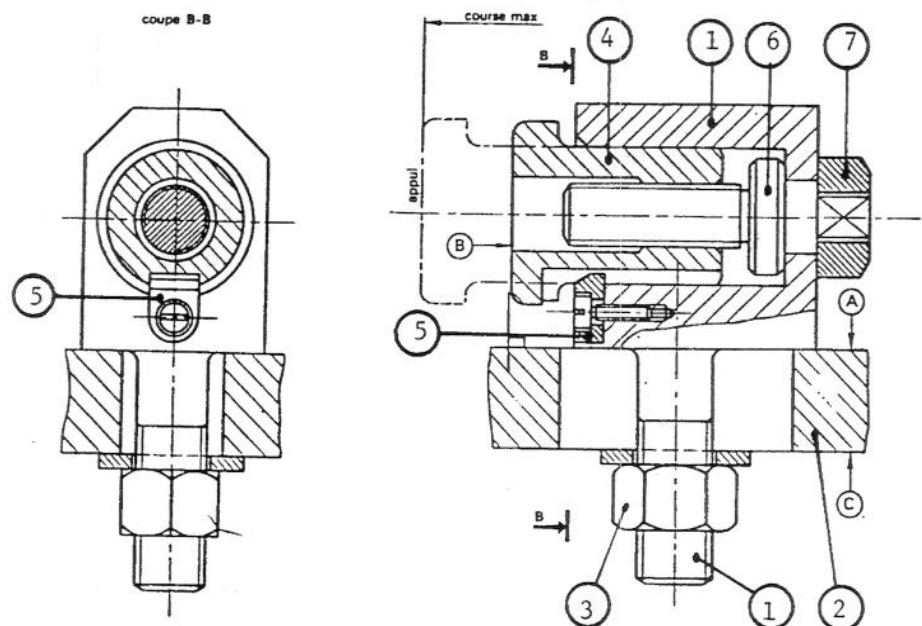


Figure 3.6: Dessin d'ensemble de la butée réglable

Question: Indiquer sur le dessin de détail du corps 1 les tolérances dimensionnelles et géométriques nécessaires au bon fonctionnement du système mécanique.

Solution: La solution est donnée à la figure 3.7, elle s'interprète comme suit:

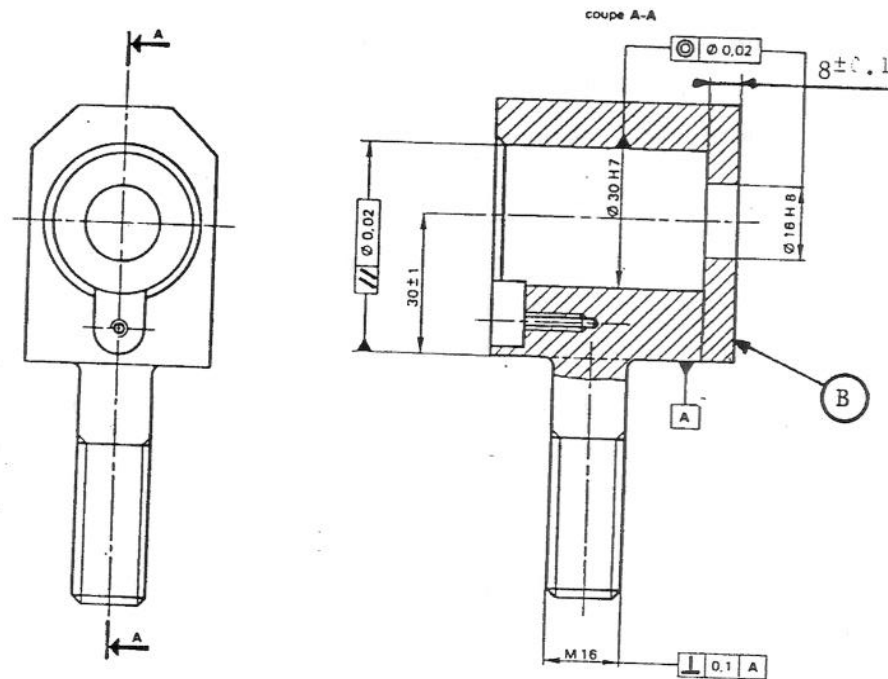


Figure 3.7: Dessin de détail avec cotations dimensionnelle et géométrique du corps 1 du système mécanique présenté à la figure 3.6.

a) Cotation dimensionnelle (figure 3.7)

- \* Le filetage de la tige inférieure doit être spécifié (M16) afin qu'il puisse entrer dans le trou oblong de la base 2.
- \* Les alésages  $\phi 30$  H7 et  $\phi 16$  H8 doivent être assez rigoureux afin qu'un léger jeu existe entre les pièces 4 et 6.
- \* L'axe de l'alésage  $\phi 30$  H7 qui est l'axe de la butée doit se situer à une certaine distance de la base A. Noter ici que l'intervalle de tolérance de cette cote est large ( $30 \pm 1$ ).
- \* Des cotes dimensionnelles auraient aussi pu être indiquées pour le montage de l'ergot 5.

\* La vis 6 doit avoir peu de jeu axial. La cote  $8^{+0.1}$  permettra de bloquer l'écrou 7 en respectant le jeu axial toléré.

b) Cotation géométrique (figure 3.7)

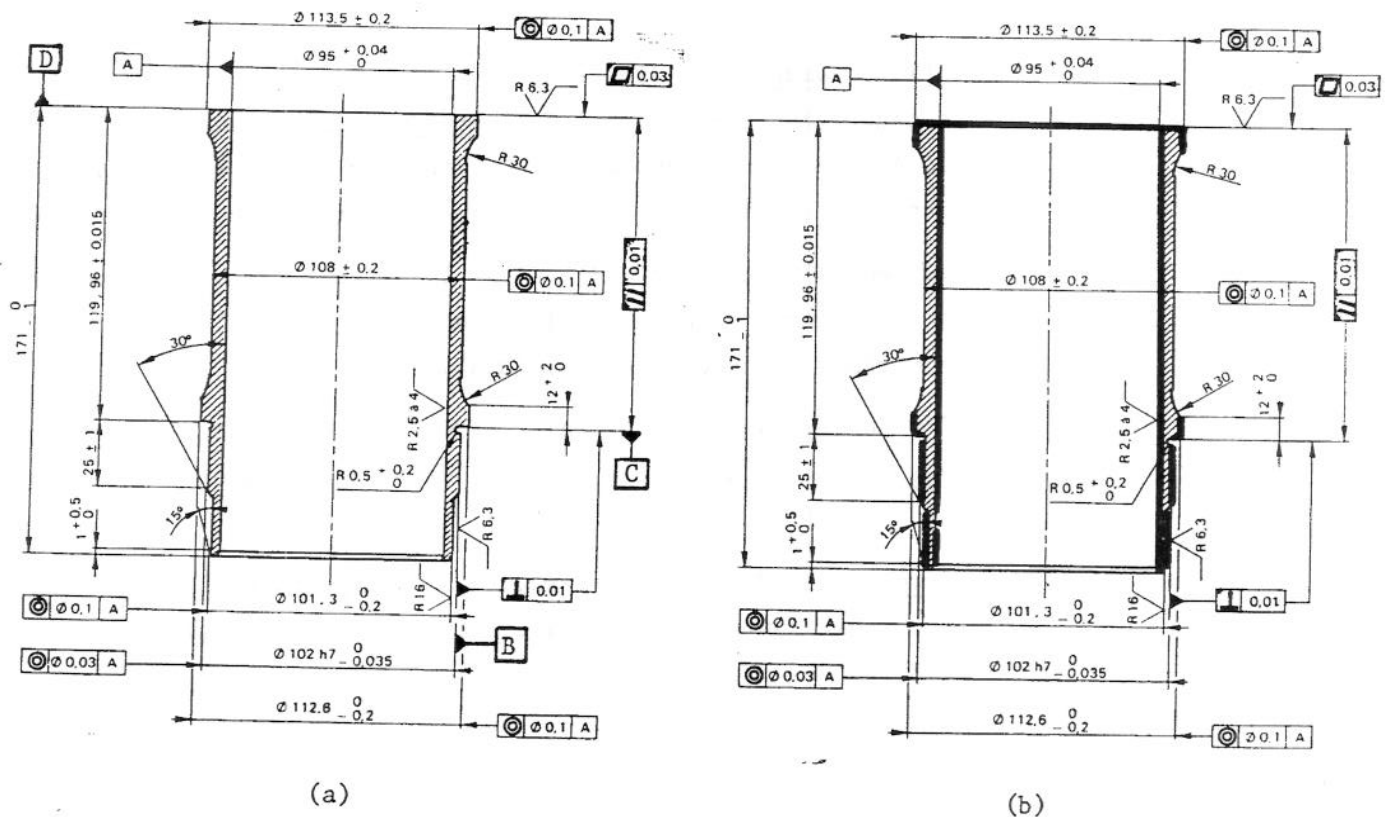
\* La tige filétée M16 doit être perpendiculaire à la surface d'appui A afin que la rondelle et l'écrou 3 viennent s'appuyer correctement sur la face C de la base 2 (voir figure 3.6).

\* Les deux alésages  $\phi 30$  H7 et  $\phi 16$  H8 doivent être coaxiaux car la vis 6 centrée dans le  $\phi 16$  H8 doit être coaxiale avec la pièce butée 4 centrée dans le  $\phi 30$  H7.

\* L'axe commun aux deux alésages  $\phi 30$  H7 et  $\phi 16$  H8 doit être parallèle à la face d'appui A si l'on désire un déplacement de la butée 4 parallèle à la base.

\* Exercice: Indiquer sur la figure 3.7 la perpendicularité de la face B par rapport à l'alésage  $\phi 16$  H8 avec une tolérance de 0.03 mm.

**EXEMPLE # 2: Chemise de moteur à explosion**



**Figure 3.8:** (a) Dessin de fabrication d'une chemise de moteur à explosion.  
(b) Les surfaces à usiner sont tracées en trait fort.

**Description:** (figure 3.8)

La chemise est positionnée dans le bloc moteur. Le piston glisse dans son alésage A. Le positionnement de la chemise dans le moteur se fait d'une part par un centrage (diamètre B) et d'autre part un appui (face d'appui c), voir la figure 3.8.a. La culasse ou tête vient bloquer la chemise en place en s'appuyant sur la face supérieure D.

La pièce brute est obtenue par moulage centrifuge et seules les surfaces en trait fort sont à usiner.

**Question:** Indiquer sur le dessin de détail de la chemise les tolérances dimensionnelles et géométriques nécessaires au bon fonctionnement.

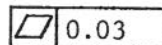
**Solution:** La solution présentée à la figure 3.8 s'interprète globalement comme suit:

a) Cotation dimensionnelle (figure 3.8)

- \* L'alésage A, le diamètre B ainsi que la distance entre les plan C et D sont les trois cotes où un faible intervalle de tolérance est à respecter car la cote correspondante du bloc moteur aura aussi un faible intervalle de tolérance.
- \* Remarquer que pour les autres cotes, les intervalles de tolérance sont beaucoup plus larges.

b) Cotation géométrique (figure 3.8)

- \* L'alésage central A doit être concentrique par rapport à la surface brute extérieure non usinée. Bien sûr, il faut que la chemise ait la même épaisseur sur tout son pourtour.
- \* Les diamètres  $\phi 113.5$ ,  $\phi 101.3$ ,  $\phi 102$  et  $\phi 112.6$  doivent être concentriques par rapport à l'alésage intérieur A.
- \* La face d'appui C doit être perpendiculaire au diamètre de centrage B. Noter que B et C sont des surfaces associées pour le positionnement de la chemise. Poser la perpendicularité de C par rapport à A aurait été une erreur.
- \* Les surfaces C et D doivent être parallèles car le bloc moteur aura aussi les faces correspondantes parallèles.
- \* Exercice: Décoder l'inscription de tolérance suivante et justifier sa raison.



Exemple # 3: Roue arrière de camionnette (pick-up)

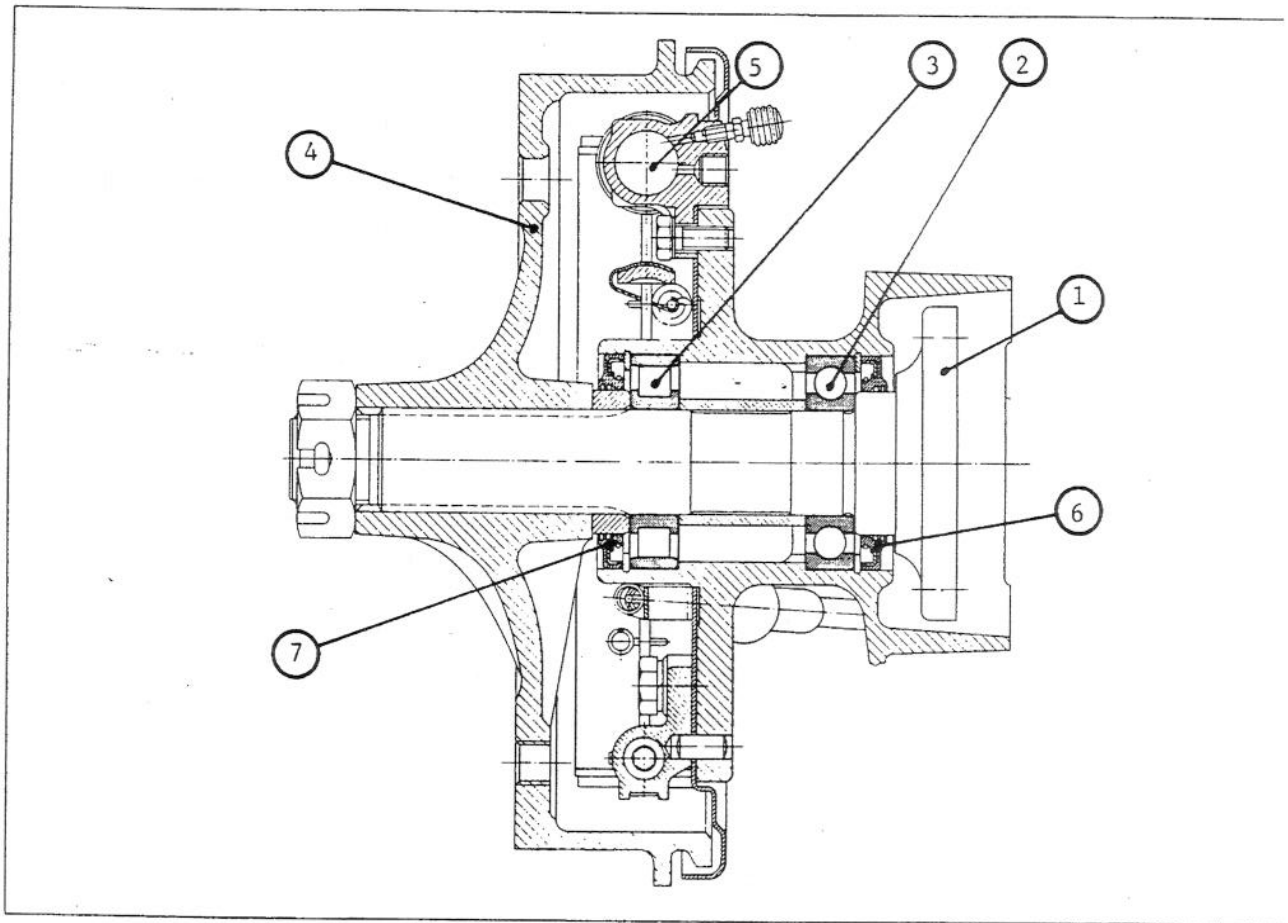


Figure 3.9: Roue arrière de camionnette. La roue est motrice et les freins sont à tambour.

Description du système (figure 3.9)

L'arbre moteur 1, entraîné par la droite et supporté par deux roulements 2 et 3, est lié en rotation au tambour 4 par des cannelures. La jante de la roue est fixée sur le tambour 4. C'est le cylindre hydraulique 5 qui assure le freinage.

Les deux roulements 2 et 3 sont montés graissés et deux joints d'étanchéité 6 et 7 évitent d'une part les fuites de graisse et d'autre part l'entrée de tout corps étranger.

Question: Indiquer sur le dessin de détail de l'arbre 1 seulement les principales tolérances géométriques nécessaires à son bon fonctionnement.



Solution:

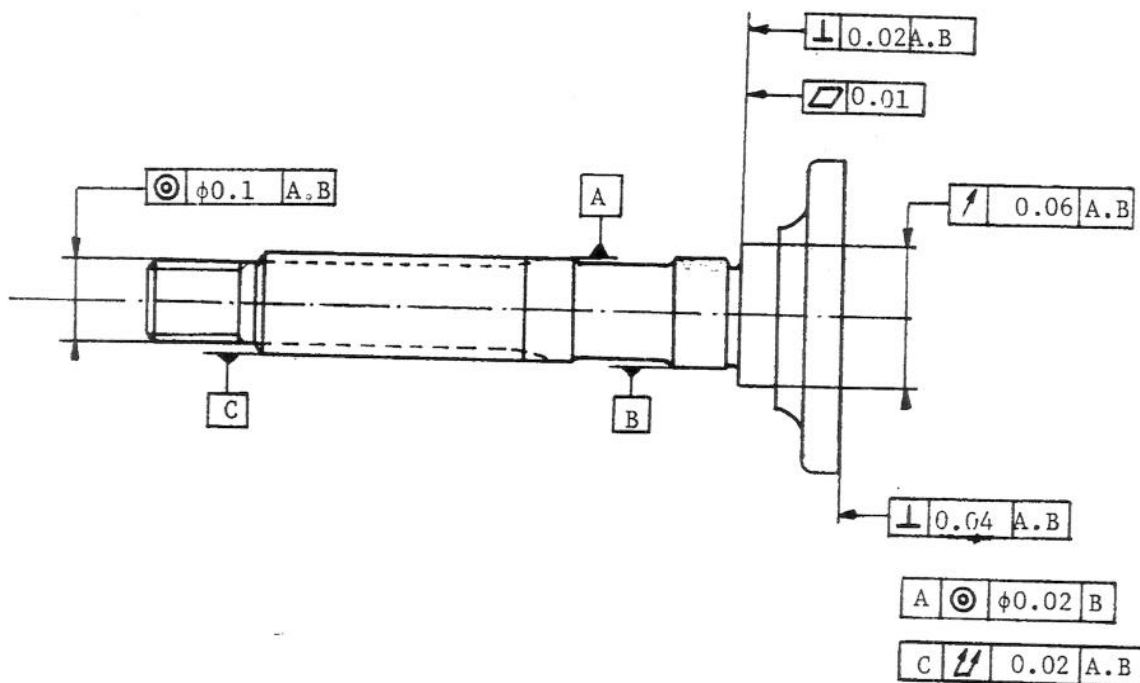


Figure 3.10: Dessin de détail de l'arbre 1 avec ses tolérances géométriques essentielles.

L'arbre 1 est aligné dans la roue par les deux roulements 2 et 3 dont les deux régions d'appui déterminent l'axe de référence de la pièce. Cet axe sera donc désigné A.B, lettres de référence attribuées à chacun des diamètres d'appui des roulements. La majorité des autres usinages prendront cet axe A.B comme référence tel que montré à la figure 3.10.

La face latérale d'appui du roulement 2 doit être plane et perpendiculaire à l'axe de référence. D'autre part, la surface de frottement du joint d'étanchéité 6 doit être concentrique avec l'axe car l'étanchéité et la vie du joint seraient rapidement affectées si cette concentricité était mauvaise.

La face d'appui à l'extrême droite de l'arbre 1 doit aussi être perpendiculaire à l'axe si l'on souhaite que la pièce qui s'accouple à cet endroit tourne également dans le prolongement de l'axe A.B.

Noter que les indications de tolérances géométriques peuvent être inscrites hors du dessin comme par exemple la concentricité des diamètres A et B à la figure 3.10 où A et B sont toutes deux des surfaces de référence.

### 3.7 Analyse fonctionnelle et calcul des intervalles des tolérances géométriques

Le paragraphe précédent a présenté à travers ses trois exemples un des aspects importants de l'analyse fonctionnelle soit l'attribution des tolérances géométriques. Ce paragraphe traite l'aspect suivant : le calcul des intervalles de tolérances à inclure aux critères géométriques choisis. Une contre-pointe fixe est analysée dans ce sens.

Le système de contre-pointe fixe est composé de trois pièces tel que montré à la figure 3.11. Sur le plan P de la pièce 1 est bloquée l'équerre 2 qui reçoit la pointe 3 dans son alésage. Les cotes nominales d'encombrement sont données sur le dessin.

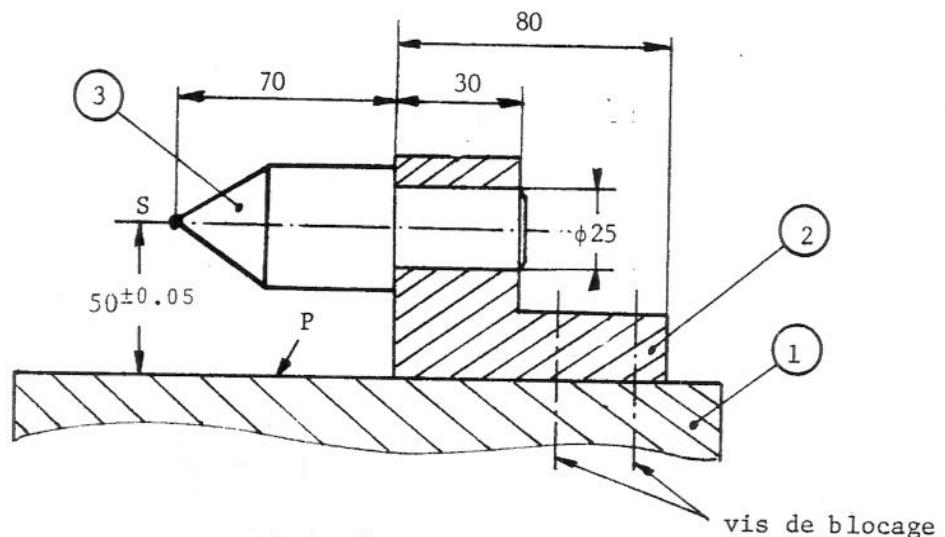


Figure 3.11: Contre-pointe

Donnée fonctionnelle: L'analyse fonctionnelle ou l'aptitude à l'emploi exige que le sommet S de la pointe se situe à  $50 \pm 0.05$  du plan P.

Question: Quelles tolérances géométriques et avec quels intervalles de tolérance sont à appliquer aux pièces du montage afin de satisfaire la condition dimensionnelle  $50 \pm 0.05$ ? Considérer toutes les surfaces planes parfaitement planes et les cylindres sans aucun défaut de cylindricité.

Solution: La dispersion ou l'intervalle de tolérance de la cote fonctionnelle à satisfaire est 0.1 mm. Cette dispersion symétrique par rapport à la cote nominale est la somme:

- Pièce 2:                      Dispersion 1: de la dispersion de la position (cote) de l'alésage par rapport à la base prenant appui sur la face P. Cette position qui est dimensionnelle aura la cote nominale 50.
- Dispersion 2: de la dispersion de parallélisme de l'alésage par rapport au plan P.
- Pièce 3:                      Dispersion 3: de la dispersion de coaxialité du cône par rapport à l'arbre venant s'ajuster dans la pièce 2.
- Pièce 2 et 3:                Dispersion 4: de la dispersion de l'ajustement entre les pièces 2 et 3. En effet si l'ajustement possède du jeu, la cote fonctionnelle de 50 sera directement affectée (figure 3.12).

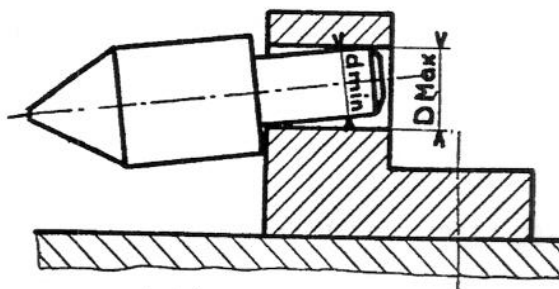


Figure 3.12: Dispersion 4. Un jeu d'ajustement affecte la cote fonctionnelle à satisfaire.

En pratique, la dispersion 4 peut facilement être éliminée, soit:

- en prévoyant un ajustement serré
- en prévoyant un ajustement légèrement conique (fourreau) avec un dispositif de serrage qui supprime tout jeu possible.

Le choix d'une de ces deux solutions élimine donc la dispersion 4. Etudions les trois autres dispersions:

#### Calcul des dispersions 1, 2 et 3

La dispersion ( $D_p$ ) de la cote fonctionnelle au point S est  $0.1 \text{ mm}$  ( $50^{+0.05}$ ); elle doit être répartie parmi les dispersion 1, 2 et 3 suivant l'équation 3.1:

$$0.1 = D_p (\text{position}) + D_p (\text{parallélisme}) + D_p (\text{coaxialité}) \quad (3.1)$$

Il faut balancer les trois dispersions pour obtenir  $0.1 \text{ mm}$ . Ce balancement est un choix qui est généralement facilité par l'expérience, surtout en fabrication. Par exemple, dans ce cas-ci, la coaxialité peut être obtenue avec une faible tolérance tandis que l'obtention du parallélisme est plus délicate à obtenir. Soit le choix suivant:

$$0.1 = 0.03 + 0.06 + 0.01 \quad (3.2)$$

ou d'après l'équation 3.1,  $0.03 = D_p (\text{position})$

$$0.06 = D_p (\text{parallélisme})$$

$$0.01 = D_p (\text{coaxialité})$$

#### Dispersion 1, de position (figure 3.13)

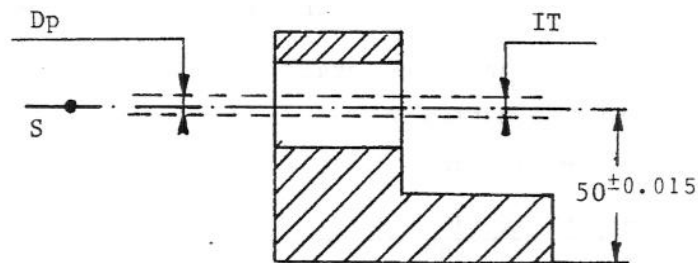


Figure 3.13: Dispersion ( $D_p$ ) due à la tolérance de position ( $IT$ ).

Cette dispersion de position est indépendante du parallélisme.  $D_p$  au point S dû à la position sera donc égal à l'intervalle de tolérance  $IT$  de la cote nominale comme le montre la figure 3.13. Cet intervalle de tolérance est situé symétriquement à la cote nominale tout comme celui de la cote fonctionnelle  $50^{+0.05}$ .

Dispersion 2, de parallélisme (figure 3.14)

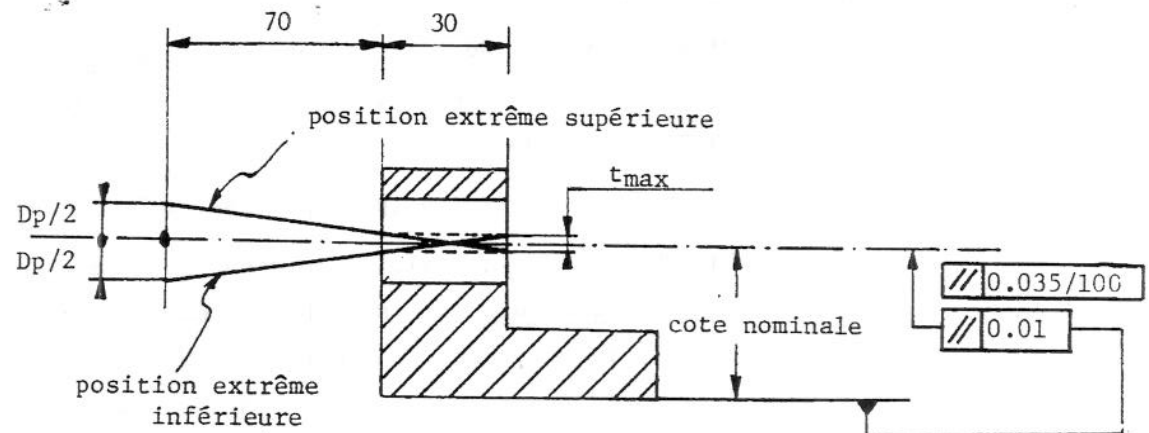


Figure 3.14: Dispersions ( $D_p/2$ ) dues à la tolérance  $t_{\max}$  de parallélisme.

Conformément à la définition des tolérances de parallélisme (paragraphe 3.5), l'axe de l'alésage doit se situer dans une bande délimitée par deux parallèles distantes de  $t_{\max}$ . L'axe peut donc prendre deux positions extrêmes qui créent en S deux dispersions,  $D_p/2$ , égales et situées symétriquement à la ligne de la cote nominale.

$D_p$ , la dispersion totale tolérée en S, due au parallélisme est égale à 0.06 (équation 3.2) donc  $D_p/2 = 0.03$ . D'après les triangles semblables de la figure 3.14:

$$\frac{D_p}{2} = \frac{t_{\max} (70 + 30/2)}{30} = 2.83 \times t_{\max}$$

$$\text{donc } t_{\max} = \frac{D_p}{5.66} = \frac{0.06}{5.66} \approx 0.01$$

$t_{\max}$  étant la tolérance de parallélisme à imposer à la pièce 2.

Dispersion 3, de coaxialité (figure 3.15).

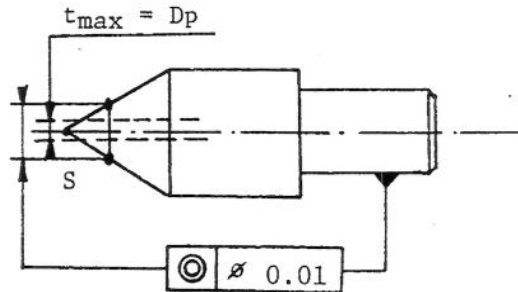


Figure 3.15: Dispersion ( $D_p$ ) due à la tolérance de coaxialité ( $t_{\max}$ ).

Conformément à la définition des tolérances de coaxialité, l'axe du cône doit être compris dans un cylindre de diamètre  $t_{\max}$  centré sur l'axe de cylindre de référence. La figure 3.15 montre que  $t_{\max}$  est directement  $D_p$  en point S due à la coaxialité. La tolérance de coaxialité est donc 0.01 tel que choisie et présentée à l'équation 3.2.

#### Conclusion:

Il est certain qu'il n'y a pas une seule solution à ce problème vue qu'elle dépend d'un choix, l'équation 3.2 peut être reformulée avec un autre choix. La solution retenue donne donc:

Pièce 2 = cote de position:  $50 \pm 0.015$

tolérance de parallélisme = 0.01 sur 30 mm.

ou 0.035 sur 100 mm.

Pièce 3 = tolérance de coaxialité = 0.01 mm.

La cotation au maximum de matière qui fera l'objet du chapitre # 5 présentera une autre approche pour le calcul des tolérances géométriques et perpendicularité, de coaxialité, de positionnement et de symétrie.





## CHAPITRE IV

### LA COTATION FONCTIONNELLE

#### 4.1 Introduction

Tout ensemble mécanique demande une analyse complète afin de mettre en évidence les conditions nécessaires à son bon fonctionnement. Une étape importante de cette analyse est la cotation fonctionnelle qui permet :

- de faire un choix raisonné entre les diverses dimensions géométriques impliquées dans le fonctionnement; ces dimensions sont appelées les dimensions fonctionnelles.
- de coter et tolérer les dimensions fonctionnelles de chaque pièce en respectant toujours l'emploi prévu dit les conditions fonctionnelles. Une fois cotées et tolérancées, les pièces pourront être fabriquées.

La cotation fonctionnelle est donc une étape indispensable entre la conception d'un produit et sa réalisation. Elle joue un rôle vital lorsque des pièces de série interchangeables sont à produire.

Les conditions fonctionnelles peuvent être aussi bien des conditions de résistance, de déformation, d'encombrement, de poids, de montage ou de fonctionnement. Le présent chapitre étudie plus particulièrement les conditions de montage et de fonctionnement qui consistent à respecter des distances positives (JEU) ou négatives (SERRAGE).

Le chapitre 1 (tolérances dimensionnelles et ajustements) a traité les ajustements avec jeu, incertains et avec serrage. Le dessin d'ensemble de la figure 4.1 ne donne aucun indice du type d'ajustement. Le jeu ou le serrage n'apparaissent pas, les surfaces des pièces sont en contact à une distance égale à la cote nominale. La cote nominale est calculée afin que les pièces remplissent les conditions de résistance des matériaux et de déformation tolérée. La cote nominale est choisie parmi des dimensions normalisées (exemple: 18, 25 mm).

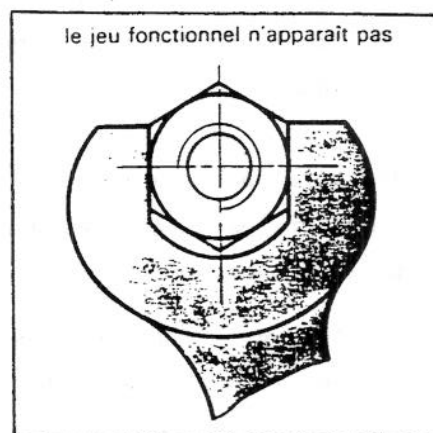


Figure 4.1: Dessin d'ensemble d'une clé introduite dans un écrou. Aucun jeu n'est représenté bien qu'il en existe un.

En cotation fonctionnelle, les jeux  $J$  et les serrages  $S$  sont représentés sur les dessins de façon amplifiée. La figure 4.2 montre la représentation fonctionnelle de la figure 4.1 où le jeu  $J$  entre l'écrou et la clé est exagéré.

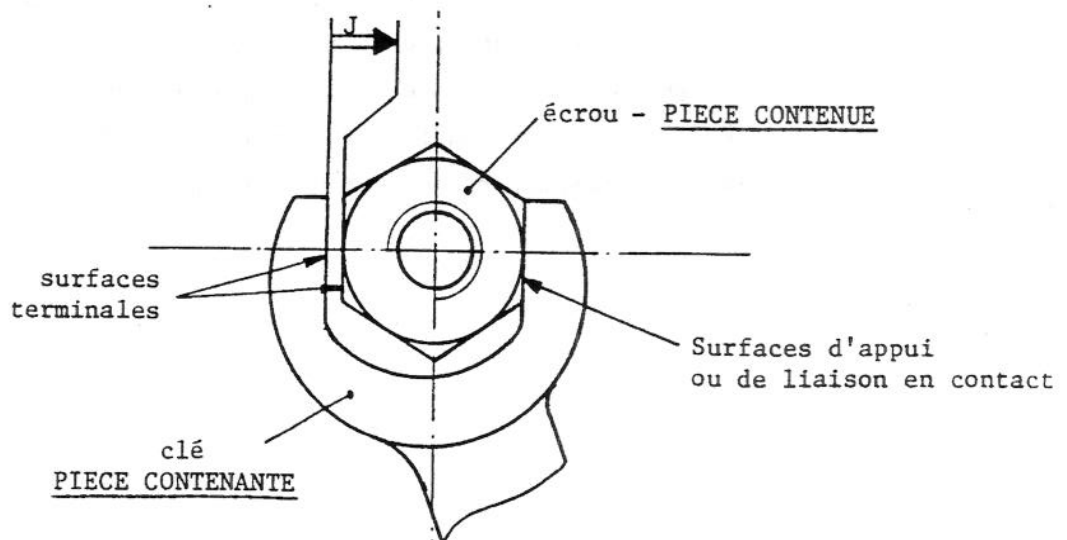


Figure 4.2: Représentation fonctionnelle d'un ajustement avec jeu

Bien que la figure 4.2 montre un montage avec jeu J, la cotation fonctionnelle s'applique aussi bien à des montages avec serrage S.

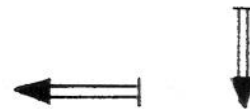
Jeu J ou serrage S: Ils sont compris entre deux surfaces terminales qui sont bien sûr de deux pièces différentes. Ils sont obtenus en créant contact entre toutes les autres surfaces d'appui des pièces impliquées.

Pièces contenues et contenantes (exemple, figure 4.2): J est la différence entre la somme des dimensions des pièces contenantes et la somme des dimensions des pièces contenues.

Par convention, J ou S sont représentés perpendiculairement aux surfaces terminales. J est un vecteur positif tandis que S est négatif. Le sens positif va de la gauche vers la droite pour les cotes horizontales et de bas en haut pour les cotes verticales. Les schémas suivants résument cette convention.



Jeu J (positif)



Serrage S (négatif)

#### 4.3 Tracé des chaînes de cotes

Tracer une chaîne de cotes consiste à établir un circuit qui permet de relier les deux surfaces terminales par l'intermédiaire de cotes entre les surfaces d'appui de toutes les pièces ayant un effet sur le vecteur condition J (jeu) et S (serrage).

#### 4.3.a) Règles générales du tracé des chaînes de cotes

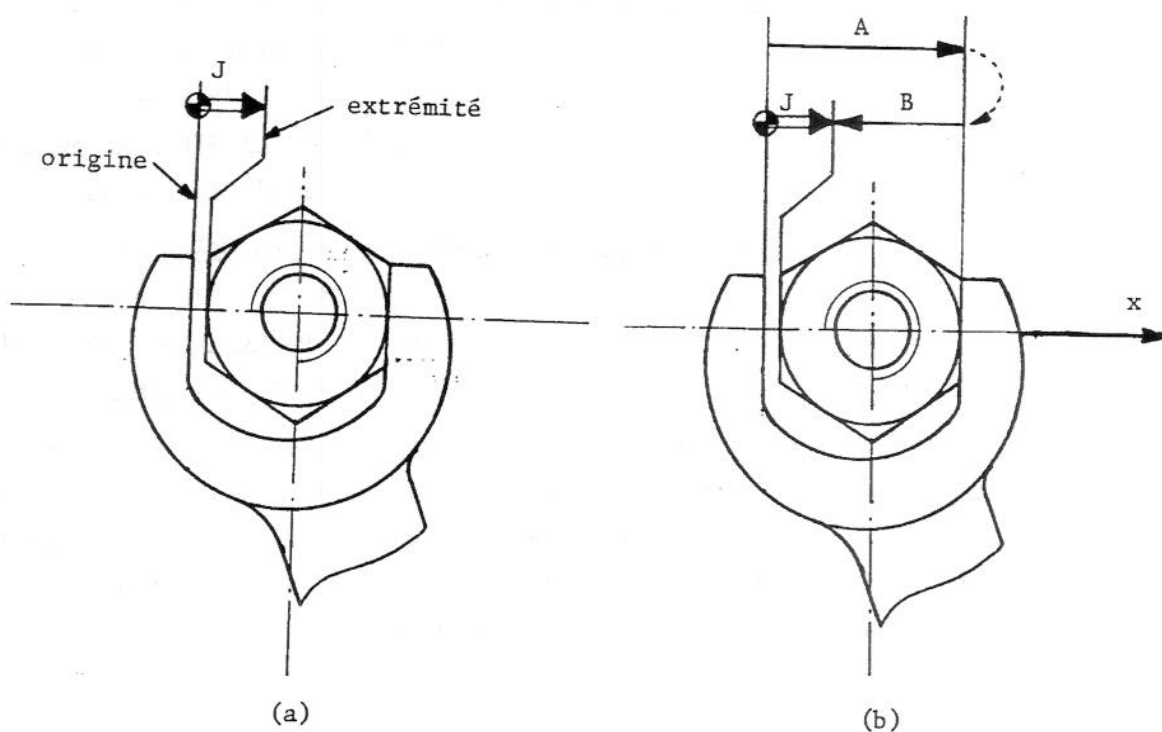


Figure 4.3. (a) Tracé du vecteur fonctionnel jeu J. Noter la surface origine  $\odot$ .  
 (b) Tracé de la chaîne de cotes à partir de la surface origine.

- 1- Poser le vecteur fonctionnel J ou S en double trait entre les deux surfaces terminales qui sont sur deux pièces différentes. Adopter la convention vectorielle présentée au paragraphe 4.2.
- 2- Identifier la surface terminale origine de J  $\odot$ .
- 3- A partir de cette surface origine, le circuit est fermé jusqu'à la deuxième surface terminale par une chaîne de cotes passant par toutes les surfaces de liaison des pièces impliquées (exemple figure 4.2.b où A est la dimension contenante, la clé, et B la dimension contenue, l'écrou).

#### 4.3.b) Expression vectorielle du vecteur fonctionnel J ou S

Le vecteur fonctionnel J de la figure 4.3.b est dans le sens de l'axe x car il représente du jeu. Ce vecteur J s'exprime vectoriellement:

$$J = A - B \quad (4.1)$$

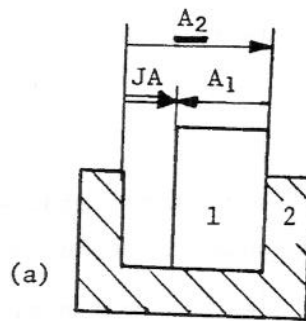
où (A) et (-B) sont les valeurs vectorielles sur x des deux cotes composant la chaîne de cotes.

Dans l'équation 4.1, A est la cote positive et B la cote négative. L'équation 4.1 se généralise de la façon suivante:

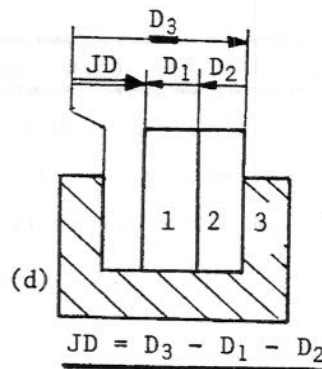
$$J \text{ ou } S = \Sigma(\text{cotes positives}) - \Sigma(\text{cotes négatives}) \quad (4.2)$$

L'expression 4.2 se formule comme suit: "Le vecteur condition fonctionnelle J ou S est égal à la somme des vecteurs dans le sens positif, moins la somme des vecteurs dans le sens négatif."

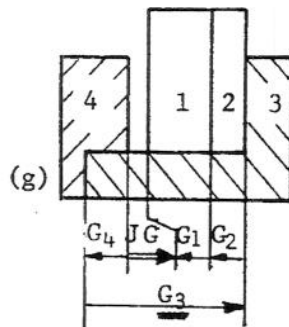
#### 4.3.c) Exemples et exercices:

Exemples

$$JA = A_2 - A_1$$

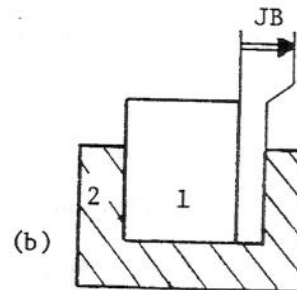


$$JD = D_3 - D_1 - D_2$$

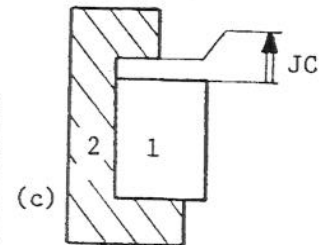


$$JG = G_3 - (G_4 + G_1 + G_2)$$

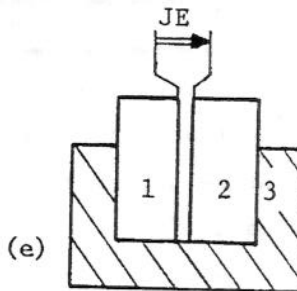
Exercices: Tracer les chaînes de cotes des jeux fonctionnels suivants.



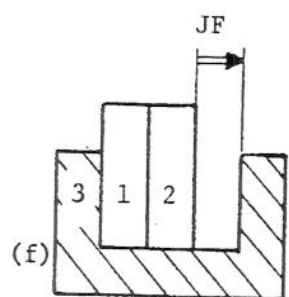
(b)



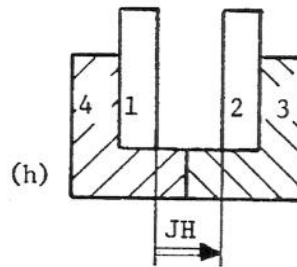
(c)



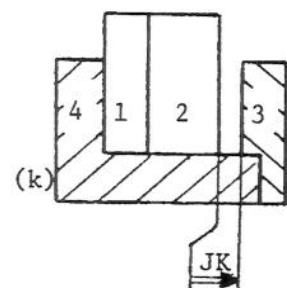
(e)



(f)



(h)



(k)

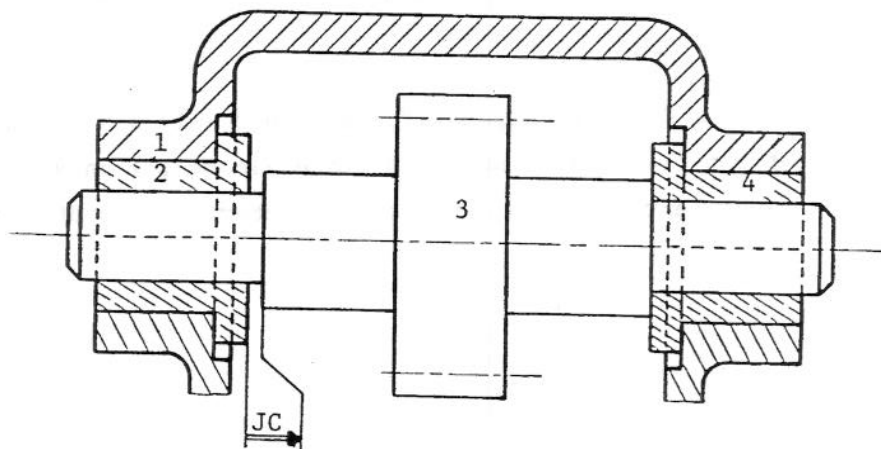
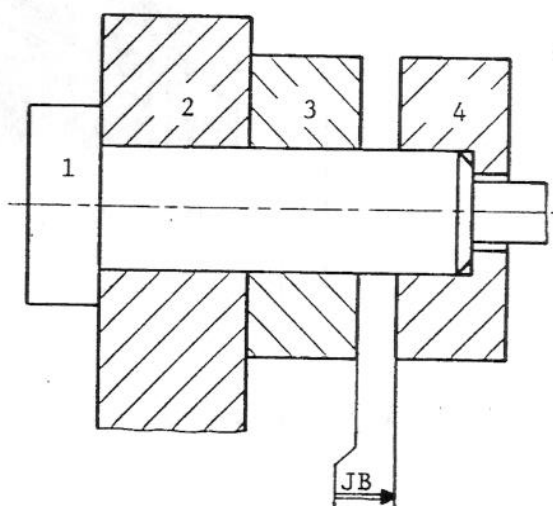
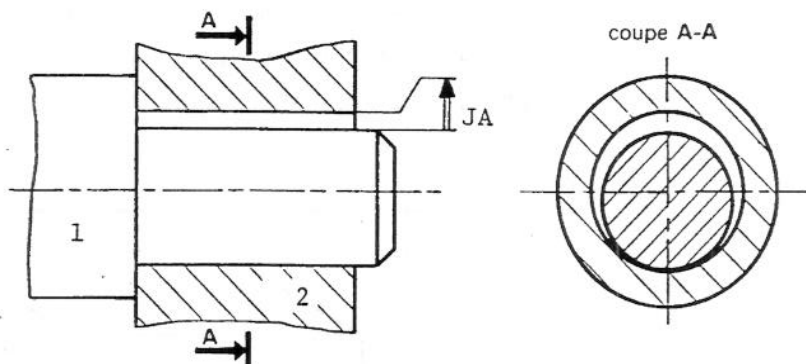
Remarque: Les montages d, e et f sont identiques; le jeu J peut être créé entre n'importe quelles pièces adjacentes en autant que les autres pièces soient en contact.

Exercice: • Souligner les cotes contenantes des chaînes de cotes.  
• Ecrire les expressions vectorielles des jeux.

Exercice: \* Tracer les chaînes de cotes pour les trois jeux fonctionnels JA, JB et JC des montages mécaniques suivants.

\* Souligner les cotes contenant des chaînes.

\* Ecrire les expressions vectorielles des jeux.



#### 4.3.d) Le serrage fonctionnel

Les ajustements avec serrage comprennent généralement deux pièces, l'assemblage se fait par chocs ou pression, à froid ou à chaud. La chaîne de cotes respecte la convention où maintenant le vecteur condition serrage  $S$  est négatif, exemple à la figure 4.4.

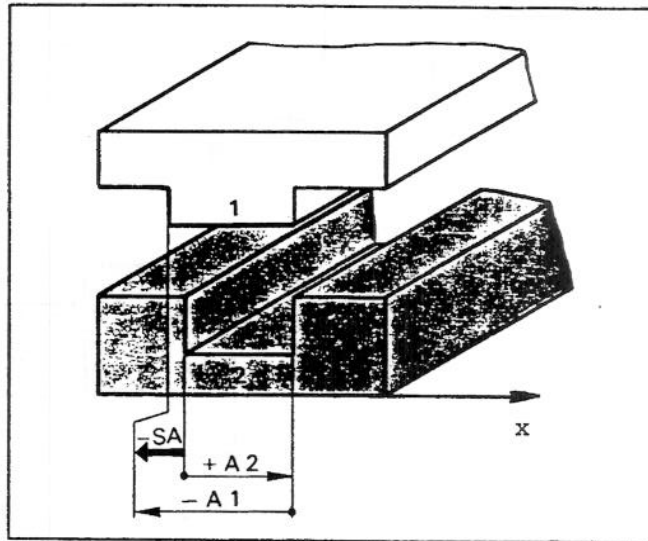


Figure 4.4: Chaîne de cotes d'un ajustement avec serrage  $S$ .

$SA$  est posé négativement

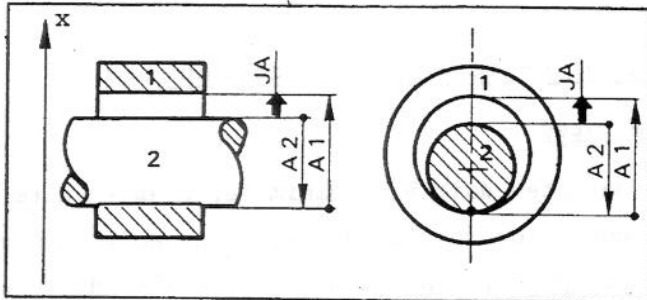
$A_1$  est la cote contenue malgré qu'elle soit supérieure à  $A_2$  la cote contenante.

L'équation du serrage fonctionnel s'écrit:

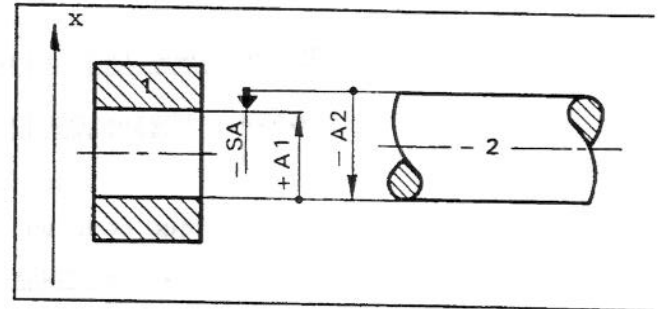
$$-SA = A_2 - A_1 \quad (4.3)$$

A titre comparatif, la figure suivante schématise de façon fonctionnelle deux ajustements arbre/alésage, l'un avec jeu et l'autre avec serrage. Les expressions vectorielles sont mentionnées.





Jeu:  $JA = A_1 - A_2$



Serrage:  $-SA = A_1 - A_2$

Les exemples de ce chapitre ainsi que les exercices correspondants seront des cas où seulement la condition fonctionnelle J sera traitée. Ces cas, très fréquents en conception, sont plus généraux que les cas de serrage où seulement deux pièces sont généralement impliquées.

4.3.e) Résumé: Comment établir une chaîne de cotes?

- 1.- Analyser la fonction qui nécessite un jeu ou un serrage fonctionnel.
- 2.- "Comprimer" toutes les pièces afin que le jeu n'apparaisse qu'à un seul endroit, entre deux surfaces terminales.

Note: Les pièces contenues ont du jeu ou du serrage à l'intérieur des pièces contenantes.

- 3.- Poser la cote fonctionnelle (J ou S) entre les deux surfaces terminales positivement pour J ou négativement pour S.
- 4.- Identifier la surface terminale d'origine.
- 5.- Tracer la chaîne de cotes; on part de la surface terminale d'origine pour rejoindre l'autre surface terminale en passant par l'intermédiaire des surfaces d'appui des pièces impliquées.

- 6.- Vérifier si la chaîne de cotes est minimum, c'est-à-dire qu'il ne doit exister qu'UNE SEULE COTE PAR PIECE. Ceci est très important.

#### 4.4 Principes fondamentaux de la cotation fonctionnelle

##### 4.4.a) Chaîne minimale de cotes

Une chaîne de cotes doit être minimale, c'est-à-dire que pour une même condition fonctionnelle, il ne doit exister qu'une seule cote par pièce. Par exemple, la chaîne de cotes relative au jeu JA de la figure 4.5 n'est pas minimum car la pièce 3 possède deux cotes.

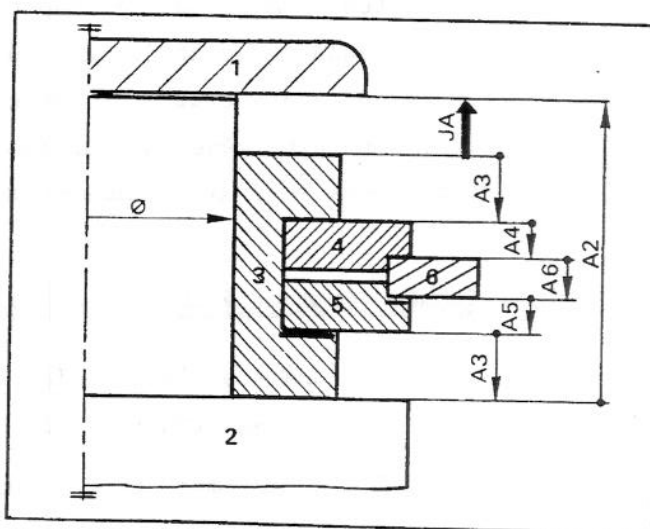


Figure 4.5: La chaîne de cotes du jeu JA n'est pas minimale; la pièce 3 possède deux cotes. Cette chaîne de cotes est fausse.

Exercice: Tracer la chaîne minimale de cotes relatives aux jeux JA et JB du montage de la figure 4.6 identique à celui de figure 4.5.

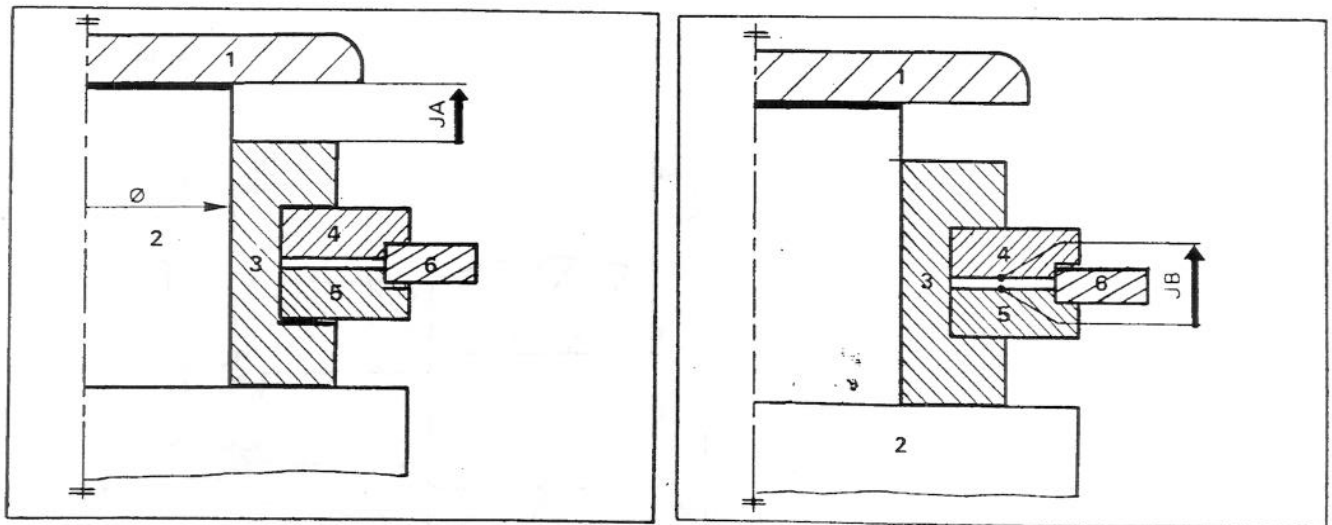


Figure 4.6: Tracer les chaînes minimales de cotes relatives aux jeux fonctionnels JA et JB.

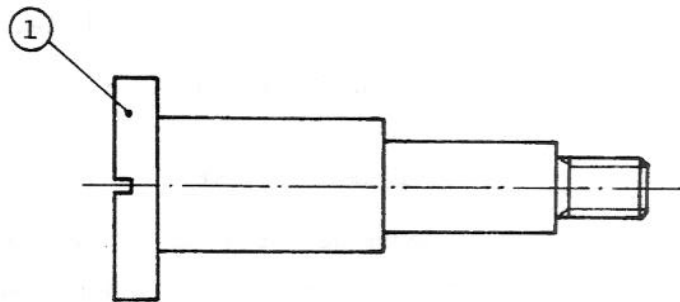
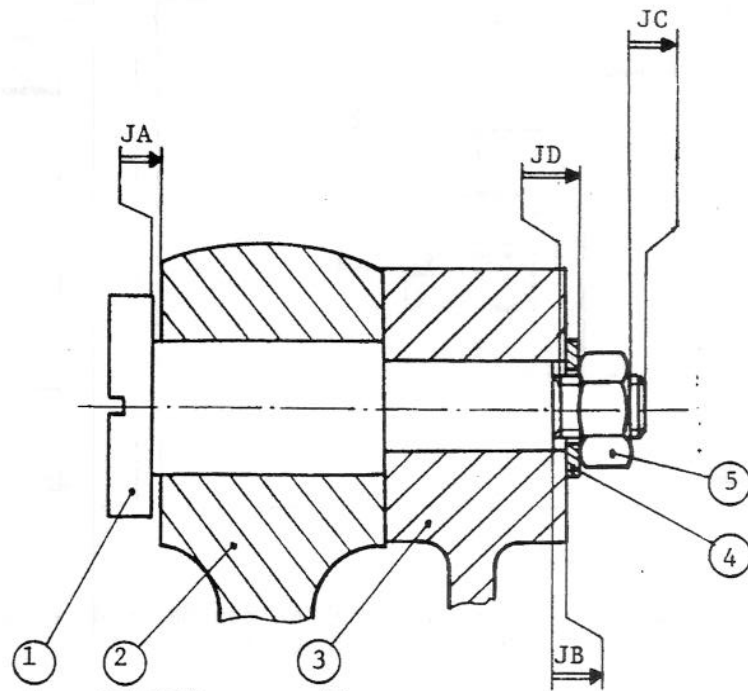
#### 4.4.b) Cotation fonctionnelle des pièces impliquées

Pour chacune des pièces, la cote fonctionnelle à inscrire est celle qui appartient à la chaîne de cotes. Les trois exercices des pages suivantes illustrent la cotation fonctionnelle d'une pièce. Dans ces exercices, l'axe 1 est identique dans les trois cas mais son montage diffère, il remplit successivement les rôles :

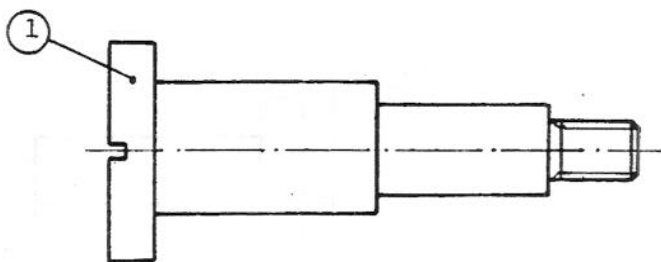
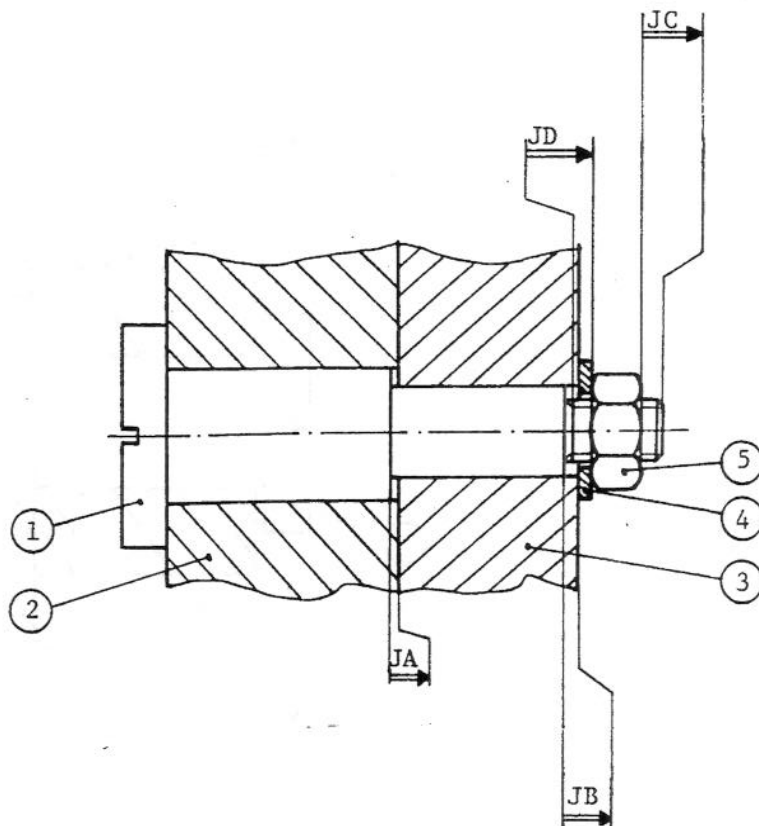
- d'axe d'articulation
- de boulon ajusté
- d'axe flottant

Remarquer bien que la cotation fonctionnelle de l'axe 1 dépendra de la fonction remplie par la pièce et non de sa géométrie.

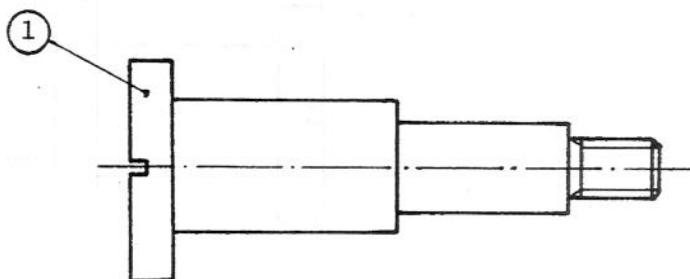
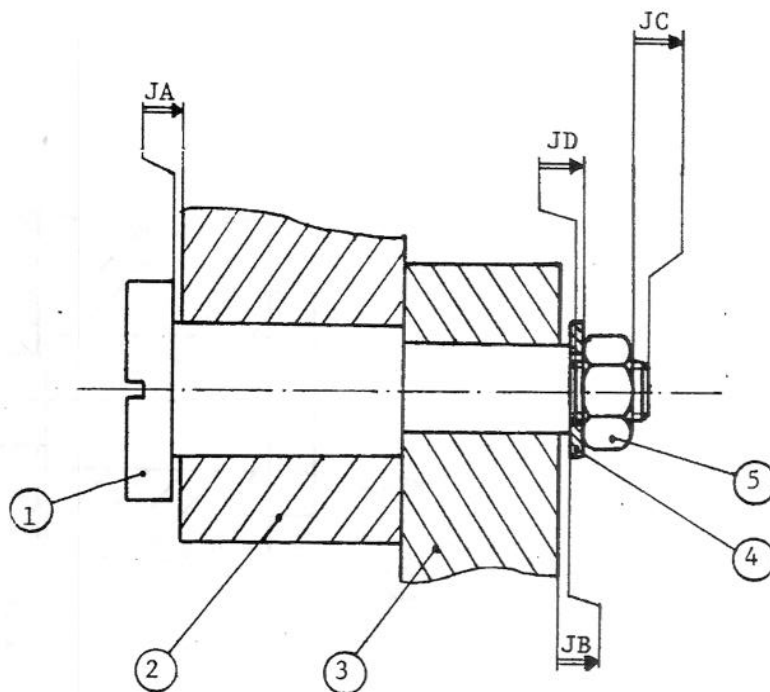
Exercice: A partir des quatre chaînes de cotes relatives à JA, JB, JC et JD, inscrire la cotation fonctionnelle correspondante sur l'axe 1.



Exercice: A partir des quatre chaînes de cotes relatives à JA, JB, JC et JD, —inscrire la cotation fonctionnelle correspondante sur l'axe 1.



Exercice: A partir des quatre chaînes de cotes relatives aux jeux JA, JB, JC et JD, inscrire la cotation fonctionnelle correspondante sur l'axe 1.



#### 4.5 Interdépendance des tolérances des cotes

Revenons à l'exemple de l'écrou et la clé avec un jeu JA. La chaîne de cotes correspondante à JA est retracée à la figure 4.7.

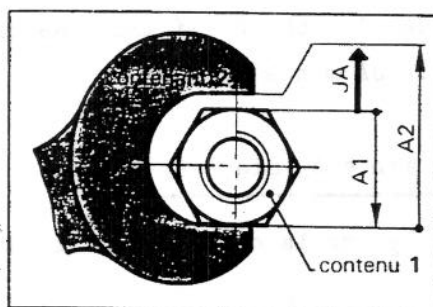


Figure 4.7: Chaîne de cotes de l'écrou introduit avec jeu dans la clé.

Hormis JA, cette chaîne de cotes comprend deux cotes,  $A_1$ , cote du contenu et  $A_2$ , cote du contenant. Ces cotes ou dimensions ne peuvent être des valeurs fixes; chacune d'elles devra posséder un intervalle de tolérance pour des raisons de fabrication. La figure 4.8 montre les schémas de ces deux pièces à leurs cotes maximum et minimum.

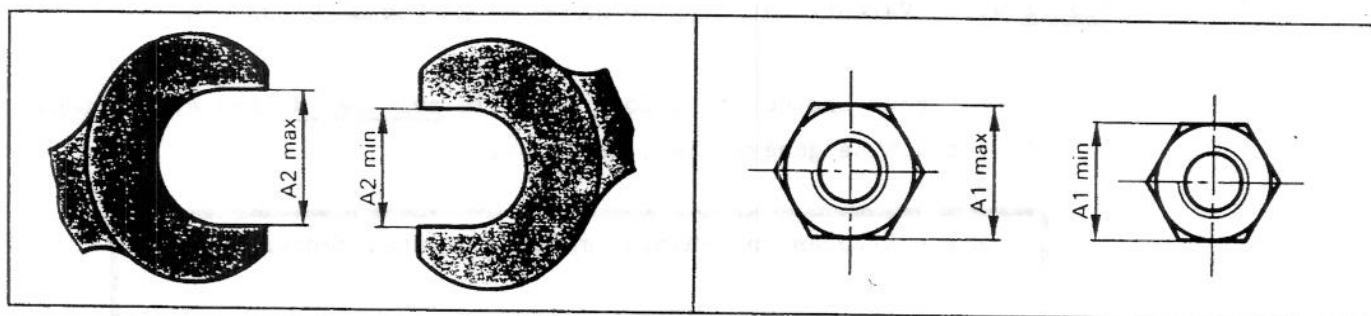


Figure 4.8: Dimensions maximum et minimum de la clé et de l'écrou.

Du fait que les dimensions  $A_1$  et  $A_2$  soient variables à l'intérieur de leur intervalle de tolérance, le jeu fonctionnel JA sera à son tour variable. Les deux cas extrêmes sont schématisés à la figure 4.9. La valeur maximum de JA ( $JA_{max}$ ) est obtenue avec la

cote  $A_2$  maximum ( $A_2 \text{ max}$ ) et la cote  $A_1$  minimum ( $A_1 \text{ mini}$ ). JA peut alors s'écrire,

$$\underline{JA \text{ max} = A_2 \text{ max} - A_1 \text{ mini}} \quad (4.4)$$

De façon identique, la valeur minimale de JA ( $JA \text{ min}$ ) est obtenue avec la cote  $A_2$  minimum ( $A_2 \text{ min}$ ) et la cote  $A_1$  maximum ( $A_1 \text{ maxi}$ ). JA min s'exprime,

$$\underline{JA \text{ min} = A_2 \text{ min} - A_1 \text{ maxi}} \quad (4.5)$$

où  $A_2$  est la cote contenante et  $A_1$  la cote contenue.

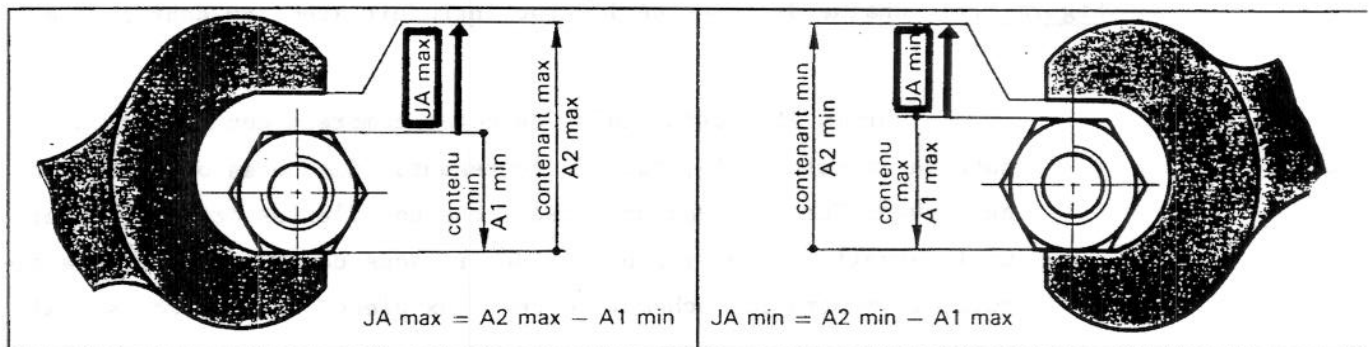


Figure 4.9: Valeurs extrêmes de JA — (a) JA max — (b) JA min

Pour une cotation fonctionnelle avec jeu J, les expressions 4.4 et 4.5 se généralisent comme suit:

$$J \text{ max} = \Sigma(\text{cotes contenantes maxi}) - \Sigma(\text{cotes contenues mini}) \quad (4.6)$$

$$J \text{ min} = \Sigma(\text{cotes contenantes mini}) - \Sigma(\text{cotes contenues maxi}) \quad (4.7)$$

Revenons aux équations 4.4 et 4.5 et exprimons leur différence:

$$\begin{aligned} JA \text{ max} - JA \text{ min} &= (A_2 \text{ max} - A_1 \text{ min}) - (A_2 \text{ min} - A_1 \text{ max}) \\ (JA \text{ max} - JA \text{ min}) &= (A_2 \text{ max} - A_2 \text{ min}) + (A_1 \text{ max} - A_1 \text{ min}) \end{aligned} \quad (4.8)$$



— Chaque terme entre parenthèses est l'intervalle de tolérance (IT) de la cote correspondante, l'équation 4.8 devient donc

$$\text{IT de JA} = \text{IT de A}_2 + \text{IT de A}_1 \quad (4.9)$$

L'équation 4.9 se formule comme suit:

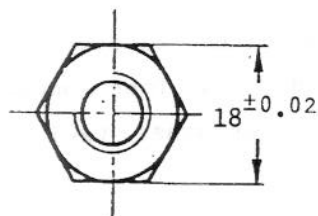
L'intervalle de tolérance IT de la cote condition fonctionnelle J est égale à la somme des intervalles de tolérance des cotes composant la chaîne de cotes.

L'intervalle de tolérance de J devra donc se répartir entre les cotes constituant la chaîne de cotes. Par conséquent, si la chaîne de cotes est minimale, chaque cote est affectée du plus grand intervalle de tolérance possible.

#### 4.6 Applications de la cotation fonctionnelle

##### 4.6.a) Recherche d'une cote avec tolérance. Exemple.

Données:



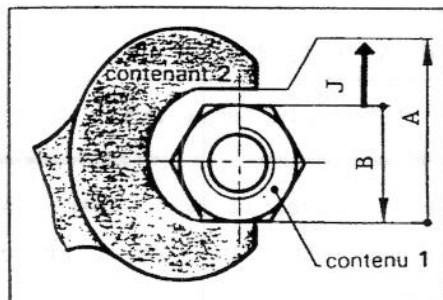
Revenons à l'exemple de l'écrou et de la clé où des

des écrous standards sont fournis à la cote de  $18 \pm 0.02$  à partir d'une barre étirée. L'intervalle de tolérance de 0.04 est celui du procédé d'obtention de la barre (étirage à froid).

Le jeu fonctionnel J entre la clé et l'écrou doit être compris entre 0.03 et 0.15 mm. Noter que ce jeu est bilimite. Ces deux limites, obtenues par essais, répondent à des conditions fonctionnelles précises. J min de 0.03 correspond à la valeur minimum permise pour introduire aisément la clé dans l'écrou. J max de 0.15 correspond à la valeur maximale permise pour que la clé n'endommage pas l'écrou lorsque le couple maximum de serrage ou de desserrage est appliqué à l'écrou.

Question:

Calculer la dimension tolérancée des clés de 18 mm à produire afin qu'elles soient interchangeables avec tous les écrous de 18 mm standards.

Solution:Données:

$$0.03 < JA < 0.15$$

$$B = 18^{+0.02}$$

$$A = \text{Inconnue}$$

Expression de J max:

$$J \text{ max} = A \text{ max} - B \text{ min}$$

$$0.15 = A \text{ max} - 17.98$$

$$A \text{ max} = 17.98 + 0.15 = 18.13 \text{ mm}$$

Expression de J min:

$$J \text{ min} = A \text{ min} - B \text{ max}$$

$$0.03 = A \text{ min} - 18.02$$

$$A \text{ min} = 18.02 + 0.03 = 18.05 \text{ mm}$$

Les clés produites doivent posséder une cote tolérancée de  $18^{+0.13}_{+0.05}$  pour qu'elles fonctionnent normalement avec tous les écrous standards. Ceci est appelé l'INTERCHANGEABILITE.

Remarque:

Vérification de l'équation 4.9:

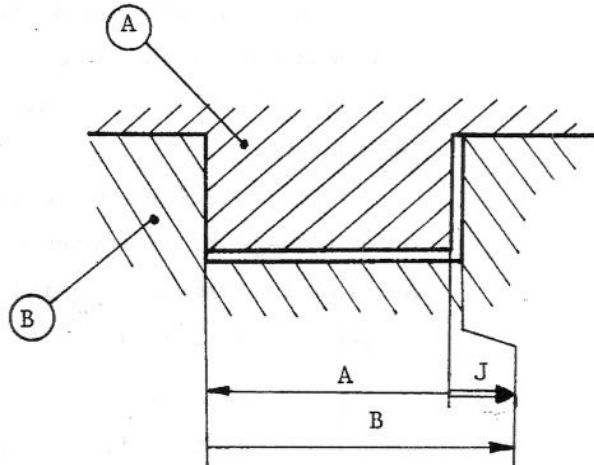
$$IT \text{ de } J = IT \text{ de } A + IT \text{ de } B$$

$$(0.15 - 0.03) = (0.13 - 0.05) + 0.04$$

$$0.12 = 0.08 + 0.04 \quad (\text{OK}).$$

#### 4.6.b) Répartition des tolérances. Exemple.

Données:



Deux pièces A et B sont ajustées par une rainure de cote nominale 30 mm. Le jeu J est bilimite pour assurer deux conditions fonctionnelles différentes.

$$0.02 < J < 0.07$$

Question:

Quelles tolérances donner aux cotes A et B de la chaîne afin que J soit dans la plage fixée?

Solution:

Equations disponibles:

$$J_{\max} = B_{\max} - A_{\min} = 0.07 \quad (1)$$

$$J_{\min} = B_{\min} - A_{\max} = 0.02 \quad (2)$$

$$IT \text{ de } J = 0.05 = IT \text{ de } B + IT \text{ de } A \quad (3)$$

Ces trois équations ne sont pas indépendantes car la dernière a été obtenue à partir des deux premières. Il faut débiter en répartissant la tolérance de J entre les cotes A et B (équation 3).

$$\begin{aligned} (3) \quad 0.05 &= IT \text{ de } B + IT \text{ de } A \\ &= 0.03 + 0.02 \end{aligned}$$

Cette répartition est un choix. Du fait qu'à tolérances égales, la fabrication d'un contenant est plus onéreuse que celle d'un contenu, l'intervalle de tolérance du contenant B est choisi plus large que celui de A. Ce point de vue sera développé à la fin du présent exemple.

Cote B (alésage)

$$(1) \quad 0.07 = B_{\max} - A_{\min}$$

$$(2) \quad 0.02 = B_{\min} - A_{\max}$$

Les intervalles de tolérance étant déjà choisis, ces deux équations ne sont pas indépendantes. Il faut se fixer un choix de première cote fonctionnelle (point de départ).

Choisissons un ajustement associé à l'alésage ou l'alésage B, le contenant, aura une cote 30 H7. Associé à l'alésage signifie que  $B_{\min} = 30.00$  (voir le paragraphe 1.4.b)

L'intervalle de tolérance de B étant fixé, il sera maintenant facile de trouver  $B_{\max}$

$$B_{\max} = B_{\min} + IT \text{ de } B$$

$$= 30.00 + 0.03$$

$$B_{\max} = 30.030 \quad (I.T. \text{ de } 30 \mu\text{m})$$

Le tableau 1.1 donne  $33\mu\text{m}$  pour une qualité 8 (acceptable par rapport à  $30\mu\text{m}$ ).

$$\underline{\underline{B = 30 \text{ H}8 = 30 \begin{smallmatrix} +33 \\ 0 \end{smallmatrix}}}$$

Cote A (arbre)

Les équations (1) et (2) donneront les deux valeurs extrêmes de la cote A.

$$(1) \quad J_{\max} = B_{\max} - A_{\min}$$

$$A_{\min} = B_{\max} - J_{\max}$$

$$= 30.033 - 0.07 = 29.963$$

$$(2) \quad J_{\min} = B_{\min} - A_{\max}$$

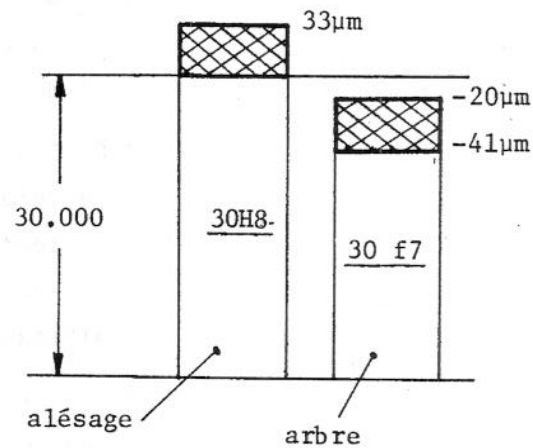
$$A_{\max} = B_{\min} - J_{\min}$$

$$= 30.000 - 0.02 = 29.980$$

$A = 30 \begin{smallmatrix} -20 \\ -37 \end{smallmatrix}$  avec un I.T. de  $17\mu\text{m}$ . Le tableau 1.1 donne  $21\mu\text{m}$  pour une qualité 7 et le meilleur choix dans les tables 1 et 2 (fin du chapitre #1) est une cote 30 f7

$$\underline{\underline{A = 30 \text{ f}7 = 30 \begin{smallmatrix} -20 \\ -41 \end{smallmatrix}}}$$

L'ajustement proposé est donc un 30 H8 f7 avec la représentation graphique suivante:



Les jeux maximum et minimum peuvent être facilement déduits de cette figure.

$$\text{Jeu min} = D_{\text{min}} - d_{\text{max}} = 30.000 - 29.980 = 0.020 \text{ ou } 20\mu\text{m}$$

$$\text{Jeu maxi} = D_{\text{max}} - d_{\text{min}} = 30.033 - 29.959 = 0.074 \text{ ou } 74\mu\text{m}$$

L'ajustement 30 H8 f7 donne une plage de jeu J très proche de celle désirée qui est comprise entre 20 et 70 µm.

#### Conclusion:

Cette solution exprimée dans le système ISO n'est pas toutefois unique car elle inclut deux choix, soit:

- le balancement des intervalles de tolérance entre les cotes A et B (équation 3).
- un ajustement associé à l'alésage ( $B_{\text{min}} = 30.000$ )

D'autres solutions sont donc acceptables mais à condition de toujours respecter le jeu bilimite J.

### Justifications des choix:

Le résultat de l'exemple ci-dessus dépend de deux choix qui peuvent paraître arbitraires de prime abord mais pourtant certaines règles doivent être respectées:

a) Répartition de l'intervalle de tolérance du jeu J entre les cotes de la chaîne de cotes.

$$IT \text{ de } J = IT \text{ de } A + IT \text{ de } B + \dots + IT \text{ de } N$$

- \* Si les pièces ont la même cote nominale, l'IT des pièces contenant (alésage) doit être supérieur à l'IT des pièces contenues (arbre) car un arbre est plus facile à réaliser qu'un alésage.
- \* Si les pièces ont des cotes nominales différentes, l'intervalle de tolérance s'accroît lorsque la valeur de la cote nominale s'accroît. La figure 4.10 montre pour une même qualité 10, la courbe d'accroissement de l'IT en fonction de la cote nominale.

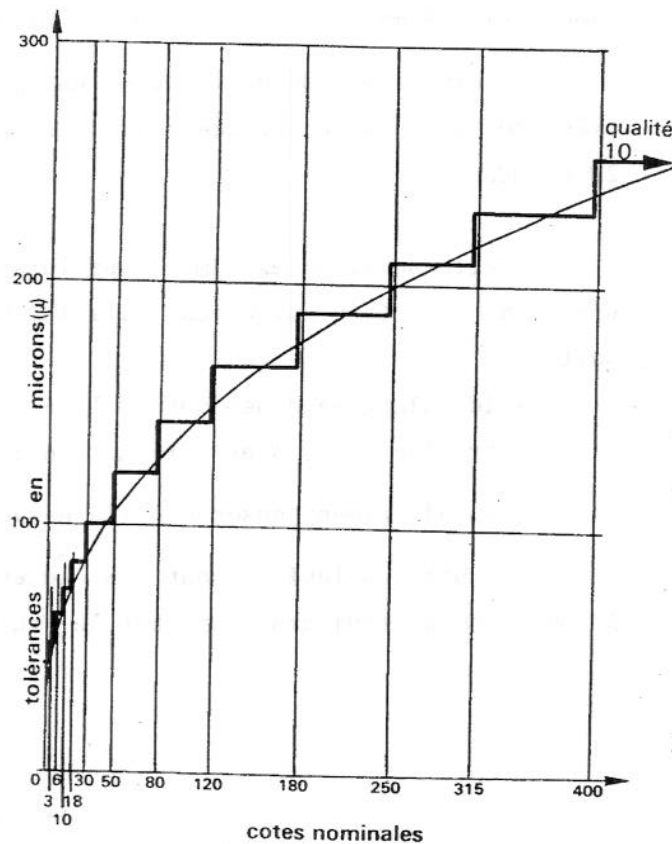


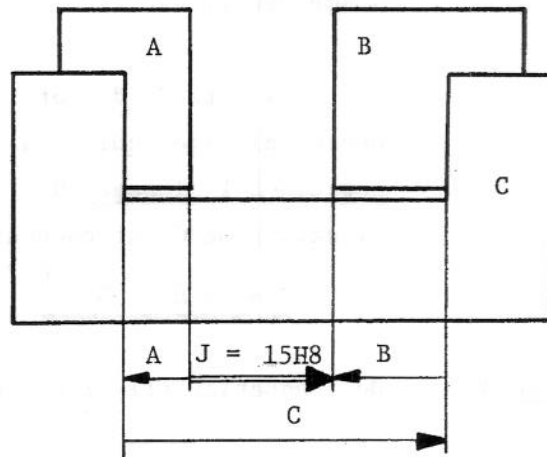
Figure 4.10: Variation de l'intervalle de tolérance IT en fonction de la cote nominale pour une même qualité 10.

b) Choix de la première cote fonctionnelle

Ce choix doit se faire autant que possible sur une cote contenante (alésage); l'ajustement peut alors être choisi associé à l'alésage. Cela donne  $D_{\min} = \text{cote nominale}$ . En production, des cotes contenantes (alésage ou rainure) sont généralement obtenues par des outils affûtés directement à une cote associée à l'alésage (du type H).

4.6.c) Le jeu fonctionnel J peut être une cote. Exemple.

Données:



Soit la chaîne de cote du jeu fonctionnel J ci-dessus, dans ce cas le jeu désiré est une cote, 15 H8. Les cotes nominales de A et B sont respectivement 6 et 14 mm.

Question: Calculer les cotes A, B et C avec leurs tolérances afin que la cote jeu de 15 H8 soit respectée.

Solution: La table 2 (fin du chapitre # 1) donne:

$$15 \text{ H8} = 15 \begin{smallmatrix} +27 \\ 0 \end{smallmatrix} \text{ avec IT de J} = 27 \mu\text{m}$$

La cote nominale de C sera:  $15 + 6 + 14 = 35 \text{ mm}$

\* Répartition des tolérances

$$\text{IT de J} = \text{IT de A} + \text{IT de B} + \text{IT de C}$$

(1)

Notons que A et B sont des cotes de pièces contenues (facile à réaliser) tandis que C est une cote de pièce contenance (plus difficile à réaliser). De ce fait, la qualité des cotes A et B sera supérieure à celle de C.

En se référant au tableau 1.1 donnant les valeurs des tolérances fondamentales en fonction des cotes nominales, la répartition suivante peut se justifier:

$$IT \text{ de } J = IT \text{ de } A + IT \text{ de } B + IT \text{ de } C \quad (1)$$

$$27 = \underbrace{5 + 8}_{\text{qualité 5}} + \underbrace{16}_{\text{qualité 6}}$$

Ce choix est acceptable, les cotes A et B (faciles à réaliser) sont de qualité supérieure à C et d'autre part la somme des IT est  $29\mu\text{m}$ , très proche des  $27\mu\text{m}$  désirés.

#### Cote C

La cote C, de cote nominale 35 mm, est une cote contenance (alésage) qui sera choisie afin de former un ajustement associé à l'alésage (H). Sa qualité (6) étant choisie, la désignation de C est connue:

$$C = 35 \text{ H}6 = 35 \begin{smallmatrix} +16 \\ 0 \end{smallmatrix}$$

#### Cotes A et B

De l'équation (1) ci-dessus:  $IT \text{ de } A = 5\mu\text{m}$  (qualité 5)  
 $IT \text{ de } B = 8\mu\text{m}$  (qualité 5)

Equations de J min et J max:

$$J \text{ min} = C \text{ min} - A \text{ max} - B \text{ max} \quad (2)$$

$$J \text{ max} = C \text{ max} - A \text{ min} - B \text{ min} \quad (3)$$

Ces deux équations ne sont pas indépendantes, il faut se fixer un choix de première cote fonctionnelle (point départ).

Posons:  $A = 6 \text{ g}5 = 6 \begin{smallmatrix} -4 \\ -9 \end{smallmatrix}$  (table 1, fin du chapitre # 1)

Les équations (2) et (3) donneront maintenant les limites de la cote B.

$$\begin{aligned} (2) \text{ devient, } B \text{ max} &= C \text{ min} - A \text{ max} - J \text{ min} \\ &= 35.000 - 5.996 - 15.000 \\ &= 14.004 \text{ mm} \end{aligned}$$



L'équation (3) peut donner B min, encore plus simple:

$$\begin{aligned} B_{\min} &= B_{\max} - IT \text{ de } B \\ &= 14.004 - 0.008 \\ &= 13.996 \end{aligned}$$

$$\text{Donc, } B = 14^{\pm 4}$$

Noter que l'IT de B est positionné symétriquement à la cote nominale, sa désignation sera donc 14 js5 (voir le commentaire 6 du paragraphe 1.3.d)

$$\underline{\underline{\text{Cote } B = 14 \text{ js5}}}$$

Conclusion:

Tout comme les applications précédentes, le résultat de cet exemple dépend de choix. Le choix de la cote C est logique. Par contre les solutions de A et B sont directement liées à la cote A posée. Avoir posé A = 6 h5 ou 6 k5 toujours en qualité 5 aurait été autant acceptable que 6 g5

4.6.d) Condition fonctionnelle unilimite

Les exemples précédents incluait des jeux fonctionnels bilimites, c'est-à-dire que pour des raisons de fonctionnement, la condition J devait être comprise entre J max et J min, deux valeurs connues. Ce paragraphe traite des cas où seulement une limite de J (J max ou J min) est nécessaire au fonctionnement de l'ensemble. Par exemple, le boulonnage représenté à la figure 4.11 montre trois conditions fonctionnelles unilimites.

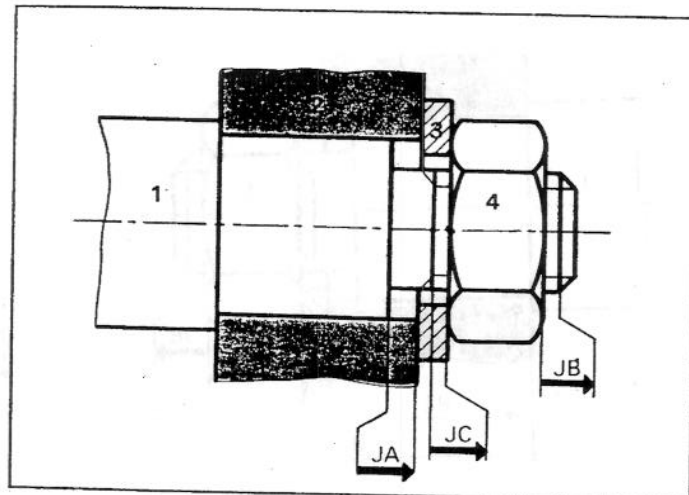
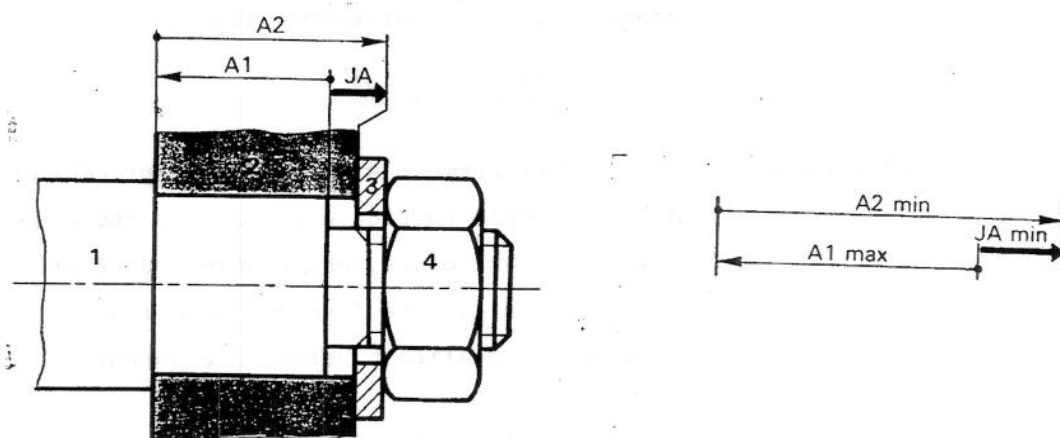


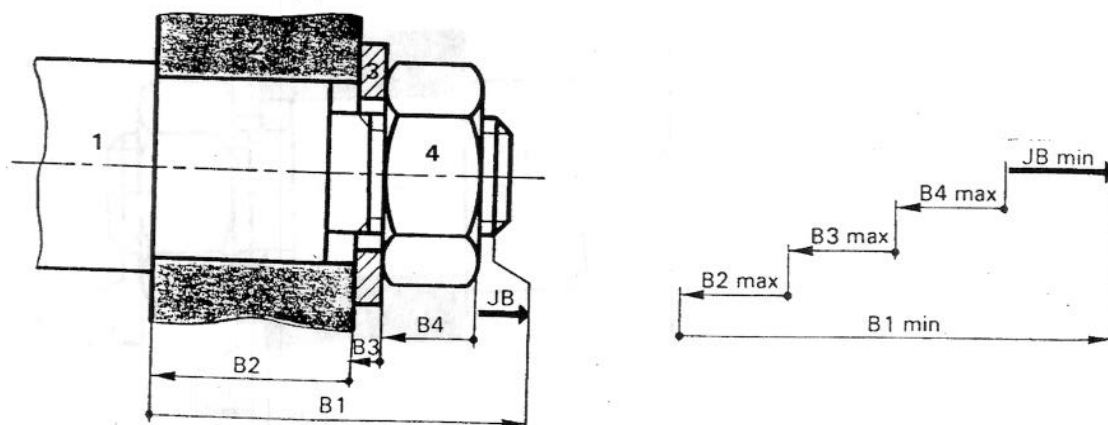
Figure 4.11: Boulonnage avec trois conditions fonctionnelles unilimites.

Le jeu fonctionnel JA doit toujours exister même dans le cas le plus défavorable car il faut que la rondelle 3 s'appuie sur la pièce 2 et non sur l'axe 1. JA min est donc la seule limite fonctionnelle alors que JA max est fonctionnellement indifférente. La chaîne de cotes se trace comme suit:



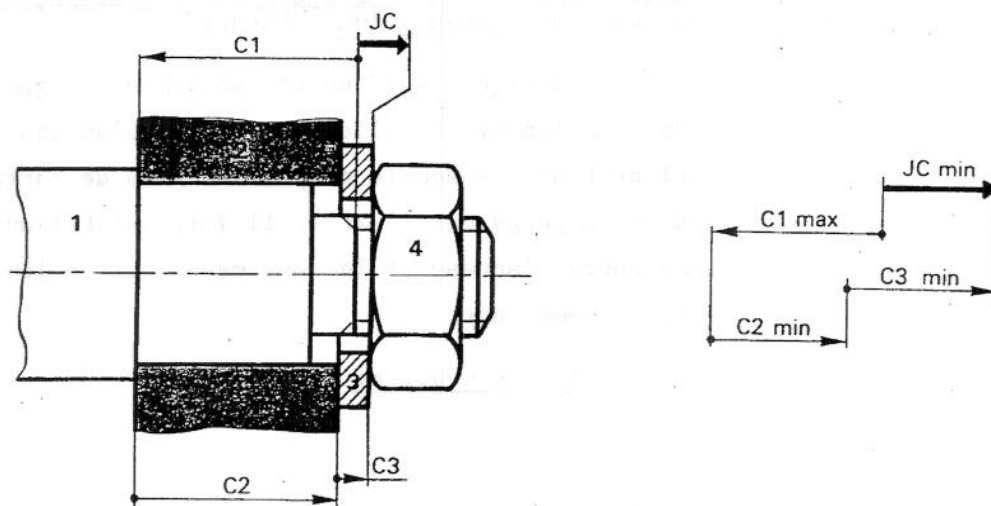
La cote de l'axe 1 relative à JA min est  $A_1 \text{ max}$  (cote contenue).

Le jeu fonctionnel JB doit toujours exister afin que l'écrou 4 soit vissé sur toute son épaisseur. JB min est donc la seule limite fonctionnelle. La chaîne de cotes se trace:

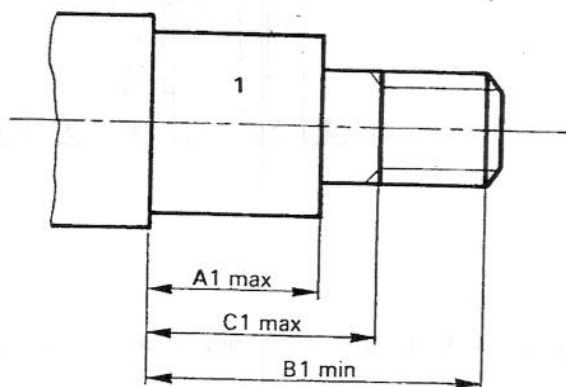


La cote de l'axe 1 relative à JB min est  $B_1 \text{ min}$  (cote contenante)

Le jeu fonctionnel  $JC$  doit aussi toujours exister car il faut garder une marge filetée pour s'assurer que l'écrou 4 puisse toujours se visser, surtout durant son serrage.  $JC_{min}$  est la seule limite fonctionnelle.



La cote de l'axe 1 relative à  $JC_{min}$  est  $C1_{max}$  (cote contenue). Globalement les trois cotes de l'axe 1 qui contribuent à assurer ces trois conditions unilimites sont tracées sur le dessin de définition ci-dessous.



Les valeurs de  $A_{1min}$ ,  $C_{1min}$  et  $B_{1max}$  (deuxième limite) sont déterminées par le bureau des méthodes qui choisit des cotes avec intervalle de tolérance assez large pour ne pas accroître le coût de production (par exemple  $\pm 1$  mm).

4.6.e) Une cotation fonctionnelle peut nécessiter des modifications du dessin de conception. Exemple

La figure 4.12 montre un arbre - pignon 2 monté sur deux roulements à billes 3a et 3b. L'anneau de retenue 8 retient tout l'ensemble en place. Afin de monter l'anneau 8 dans la gorge sur l'arbre, il doit exister un jeu fonctionnel JA entre l'anneau et le roulement 3a. Ce jeu J bilimite est fixé comme suit:

$$0 < JA < 0.2 \text{ mm}$$

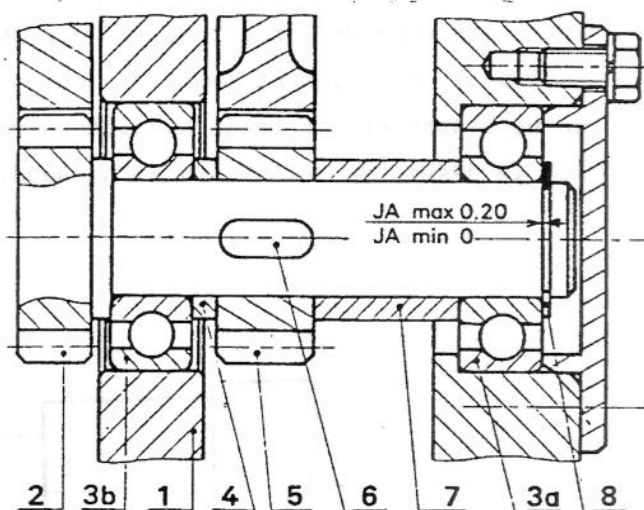
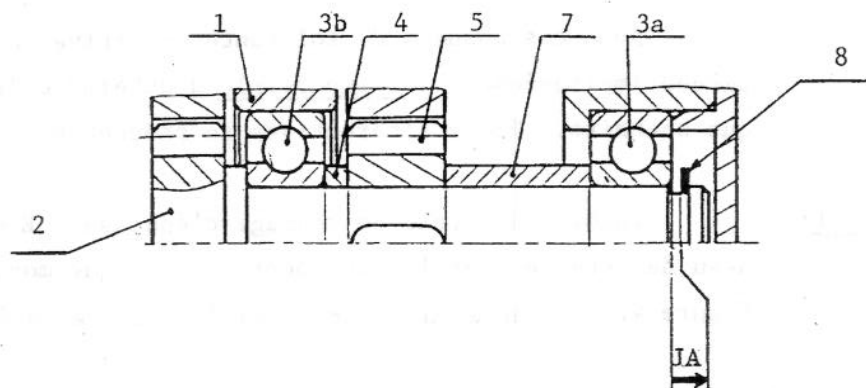


Figure 4.12: Montage de roulements avec retenue axiale par l'anneau 8.

Tracer la chaîne de cotes relatives au jeu JA.



Combien de cotes d'épaisseur de pièces comprend la chaîne?

Données:

Les pièces impliquées dans la chaîne sont de coûts de production raisonnables, leurs épaisseurs sont les suivantes:

$$A_3 = 11 \overset{0}{-0.12} \quad (\text{écarts en mm}).$$

$$A_2 = 59 \overset{\pm 0.1}{}$$

$$A_7 = 19 \overset{\pm 0.05}{}$$

$$A_5 = 13 \overset{\pm 0.05}{}$$

$$A_4 = 3 \overset{\pm 0.05}{}$$

$$A_8 = 1 \overset{0}{-0.06}$$

Question:

Vérifier si le jeu fonctionnel JA peut être respecté avec ces épaisseurs données, si non, proposer une autre solution de conception.

Solution:

$$\begin{aligned} J_{\max} &= A_2_{\max} - (2 A_3 + A_4 + A_5 + A_7 + A_8)_{\min} \\ &= 59.1 - (21.76 + 2.95 + 12.95 + 18.95 + 0.94) \\ &= 1.55 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{\min} &= A_2_{\min} - (2 A_3 + A_4 + A_5 + A_7 + A_8)_{\max} \\ &= 58.9 - (22 + 3.05 + 13.05 + 19.05 + 1) \\ &= 0.75 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$0.75 < J_{\text{réel}} < 1.55$$

Avec ces données de tolérances relatives aux sept pièces impliquées, il est impossible d'atteindre le jeu JA tel que souhaité. Trois alternatives se présentent.

Alternative # 1:

Insérer une cale de réglage d'épaisseur E entre l'anneau de retenue 8 et le roulement 3a tel que montré à la figure 4.13. Cette cale permettra de réduire JA trop important.

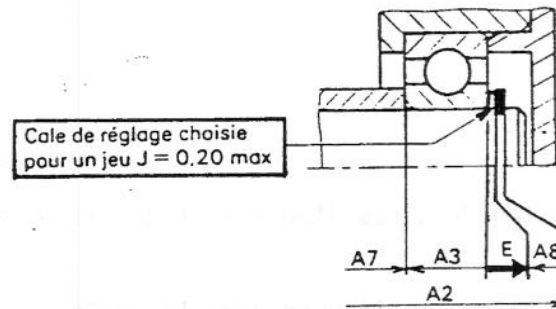


Figure 4.13: Cale de réglage d'épaisseur E choisie pour atteindre le jeu JA ( $0 < JA < 0.2$ )

Plusieurs épaisseurs de cales de réglage devront être disponibles au montage, épaisseurs 0.75, 0.95, 1.15, 1.35 mm. Le monteur installe la cale d'épaisseur appropriée pour réduire le jeu à des valeurs comprises entre 0 et 0.2 mm tel que désiré.

Cette alternative est acceptable pour des prototypes ou de très petites séries. En production de série, une telle alternative n'est pas conseillée car le temps de montage sera accru par le choix de la bonne cale. D'autre part, le raiseau du service après-vente du produit devra distribuer le jeu de cales d'épaisseur disponibles.

Alternative # 2:

Réduire les intervalles de tolérance des épaisseurs des sept pièces impliquées dans la chaîne de cotes.

Pour atteindre JA désiré, cette alternative propose aux fabricants de roulements, d'engrenages, de bagues et d'anneaux de réduire les intervalles de tolérance des pièces. Ceci aura un effet direct sur le coût de production de ces pièces, voir la figure 1.11 (page 18) où la courbe du coût relatif d'un usinage est tracée en fonction de l'intervalle de tolérance désiré.

Alternative # 3: Modifier le dessin de conception.

La modification aura pour but de réduire le nombre de pièces impliquées dans la chaîne de cotes de JA le jeu axial de l'axe 2. JA pourra ainsi être atteint sans réduire les intervalles de tolérance des dimensions déjà donnés. La modification proposée est dessinée à la figure 4.14.

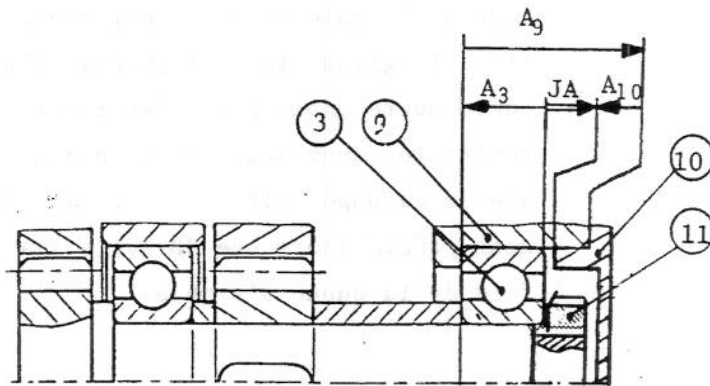


Figure 4.14: Alternative # 3. Un écrou de serrage 11 est installé sur l'arbre. Maintenant le jeu axial JA n'implique plus que trois pièces au lieu de sept.

L'extrémité droite de l'arbre a été modifiée. L'anneau de retenue 8 a été remplacée par l'écrou de serrage 11 qui bloque axialement toutes les pièces sur l'axe. Maintenant le jeu axial JA est créé entre le roulement 3 et le couvercle 10. La chaîne de cotes relative au nouveau jeu JA n'implique plus que trois pièces: le

roulement 3, le couvercle 10 et le support 9. A partir de cette nouvelle chaîne de cotes simplifiée, les cotes de ces trois pièces peuvent être calculées pour atteindre  $0. < JA < 0.2$ .

Conclusion:

Les deux premières alternatives proposées créent un accroissement de coûts de production. A la rigueur, toutes deux peuvent être acceptables pour des montages unitaires ou de très petites séries (1 à 10 pièces). Par contre, l'alternative # 3 s'avère la meilleure solution, elle convient aux productions de série sans demander de précisions ou de réglages supplémentaires.

#### 4.7 Cotation fonctionnelle sur les surfaces inclinées

##### 4.7.a) Ajustement en queue d'aronde

Les ajustements en queue d'aronde sont utilisés pour assurer le guidage d'un coulisseau 2 par rapport à une pièce fixe, la glissière 1 (figure 4.15). Ce type de montage est entre autre employé sur les machines-outils. La figure 4.15 montre les deux jeux fonctionnels JA et JB à respecter pour que le guidage soit correct. JA assure un guidage suffisamment précis alors que JB évite les surabondances d'appui au fond de la queue d'aronde.

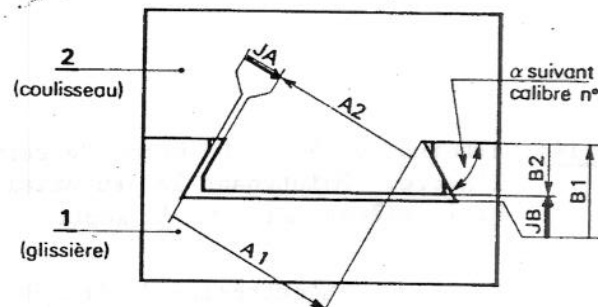


Figure 4.15: Ajustement en queue d'aronde avec ses deux jeux fonctionnels JA et JB.



La représentation de JA adoptée à la figure 4.15 n'est pas pratique car la chaîne de cotes se trouve inclinée par rapport au plan de glissement des deux pièces. Il est plus facile, surtout pour la fabrication et le contrôle, d'adopter la représentation de la figure 4.16 où dans la chaîne J'A, les cotes  $A'_2$  et  $A'_1$  sont directement des cotes machine. Il est certain que l'angle  $\alpha$  doit être tolérancé.

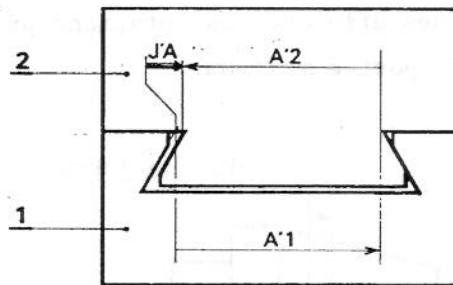


Figure 4.16: Ajustement en queue d'aronde avec la cotation fonctionnelle adoptée.

Remarque:

Les cotes  $A'_2$  et  $A'_1$  ne peuvent être mesurées directement car il est très difficile de se positionner sur les deux arêtes vives. Ces cotes sont obtenues indirectement par une mesure sur piges de diamètre  $d$  (figure 4.17). Un calcul simple permet de connaître la cote indirecte  $C$ .

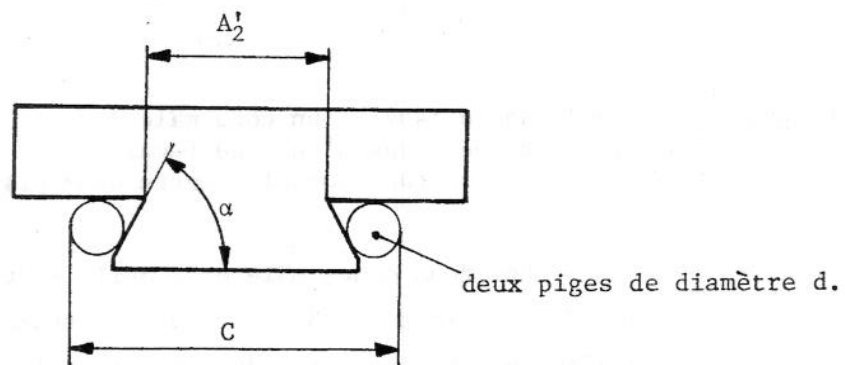
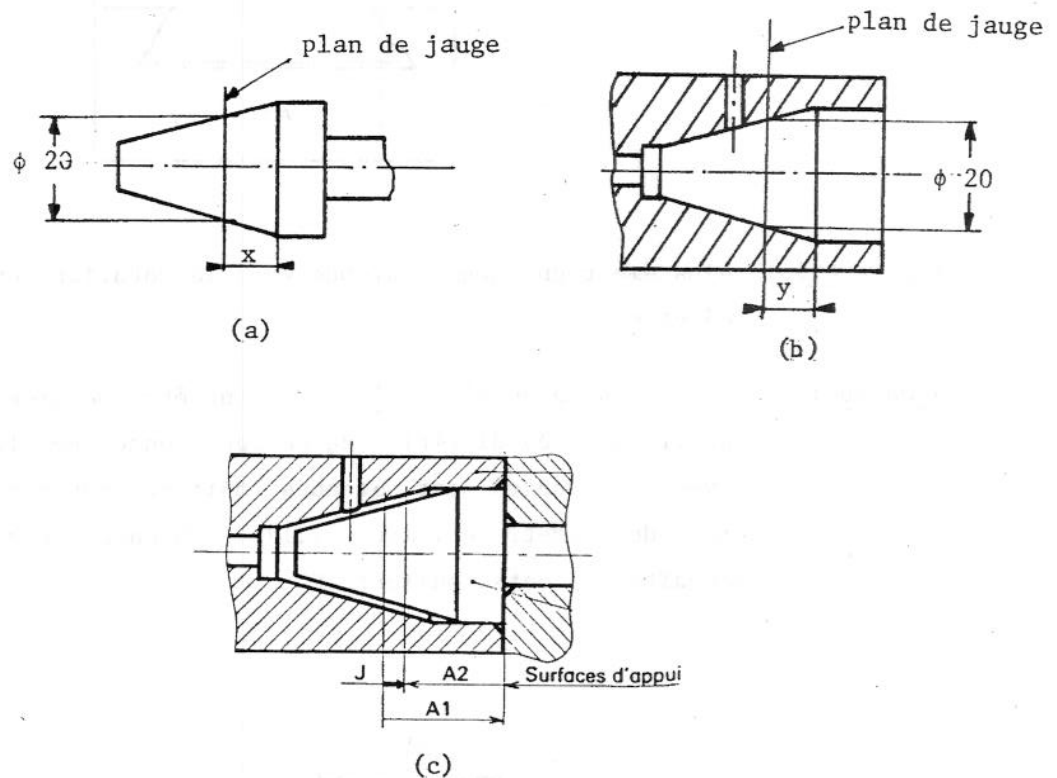


Figure 4.17: Mesure sur piges de la largeur d'une queue d'aronde mâle.

#### 4.7.b) Ajustement sur cône d'appui

En cotation fonctionnelle les surfaces coniques sont définies par l'angle, le diamètre théorique d'une section droite et la position de cette section le long de l'axe. Cette section théorique est appelé PLAN DE JAUGE. La figure 4.18 montre un cône mâle(a) et femelle(b) où le même plan de jauge (diamètre  $\phi 20$ ) est positionné. Les plans de jauge se situent toujours au voisinage des grands diamètres des cônes afin que les cotations prennent comme référence un plan de portée maximum.



**Figure 4.18:** (a) Plan de jauge d'un cône mâle.  
 (b) Plan de jauge d'un cône femelle  
 (c) Cotation fonctionnelle entre deux plans de jauge.

Les deux cônes mâle et femelle sont assemblés avec un jeu  $J$  à la figure 4.18.c; les deux surfaces terminales de la chaîne de cotes sont les deux plans de jauge respectifs des deux cônes tels que définis dans les dessins de définition de chacune des pièces.

## CHAPITRE V

### LA COTATION AU MAXIMUM DE MATIERE

Le but de ce chapitre consiste à montrer, pour des pièces à assembler, l'interdépendance entre la valeur des jeux fonctionnels et la valeur des tolérances de position (perpendicularité, coaxialité, localisation, symétrie).

#### 5.1. Définition: Etats maximal et minimal de matière.

La cotation au maximum de matière est employée pour des pièces à assembler. Les ajustements sont généralement avec jeu. Les conditions au maximum et minimum de matière sont respectivement les conditions aux jeux maximum et minimum. La figure 5.1 schématise ces conditions extrêmes pour un ajustement  $30\ H7/f7$  où l'alésage  $30\ H7$  signifie  $30\ \begin{smallmatrix} +21 \\ 0 \end{smallmatrix}$  et l'arbre  $30\ f7$ ,  $30\ \begin{smallmatrix} -20 \\ -41 \end{smallmatrix}$ .

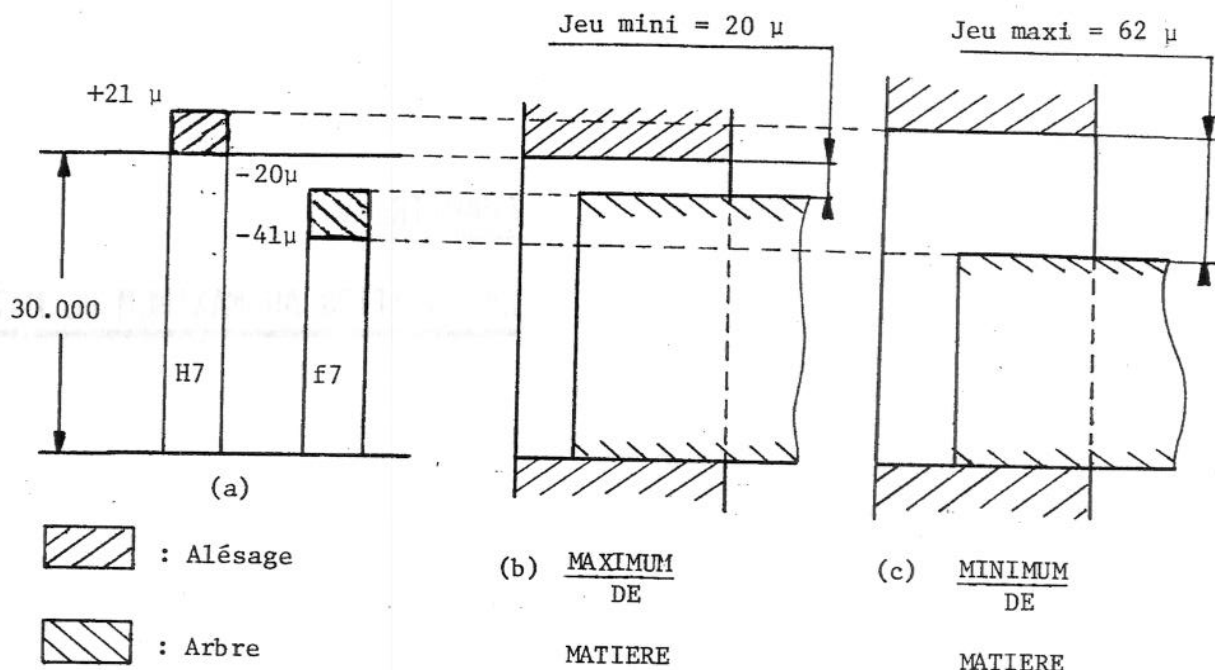


Figure 5.1 (a) Schématisation de l'ajustement 30 H7/f7, avec jeu.  
 (b) L'ajustement à l'état maximal de matière. Le contenant est mini tandis que le contenu est maxi.  
 (c) L'ajustement à l'état minimal de matière. Le contenant est maxi tandis que le contenu est mini.

Comme le montre la figure 5.1, un ajustement se trouve à l'état maximal de matière lorsque le contenant (l'alésage) est à sa cote minimale permise alors que le contenu (l'arbre) est à sa cote maximale permise. Les deux pièces contiennent le maximum de matière tout en demeurant à l'intérieur de leurs tolérances. L'écart de cote est minimal, dans le cas de la figure 5.1.b, c'est un jeu minimum.

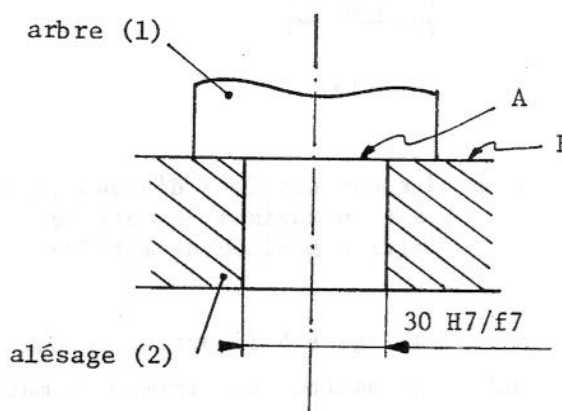
Au contraire, un ajustement à l'état minimal de matière se trouve aux conditions extrêmes opposées, le contenu est minimum et le contenant est maximal. Le maximum permis de matière est retiré des deux pièces pour donner un jeu maximum.

La condition au maximum de matière sera la condition retenue pour le calcul des tolérances géométriques au maximum de matière car elle offre le minimum de jeu et de ce fait un minimum de latitude de localisation d'une pièce par rapport à l'autre est permise.

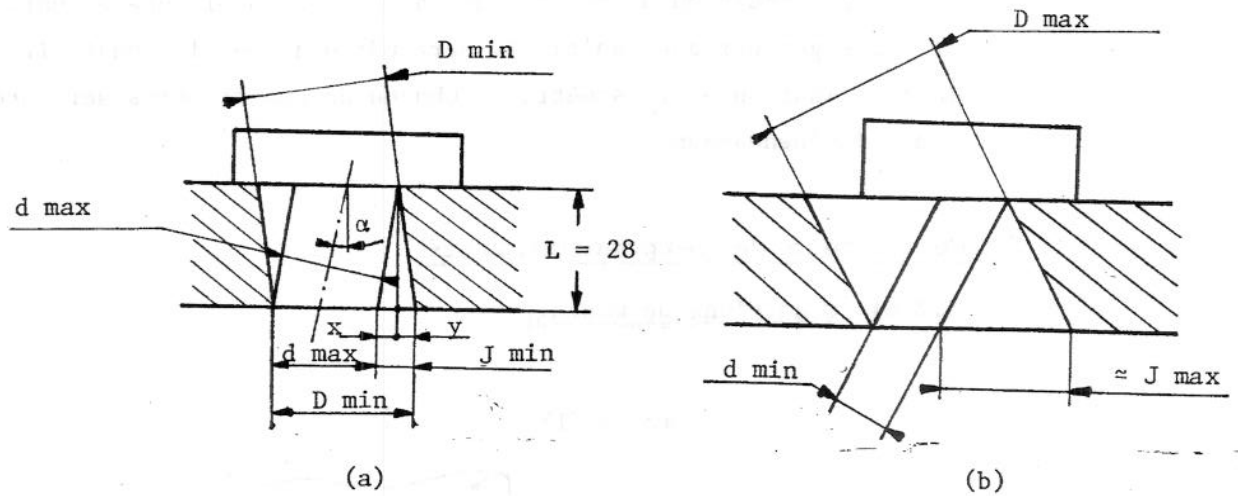
La condition au maximum de matière est appliquée à quatre critères géométriques soit: la perpendicularité, la coaxialité, la localisation et la symétrie. Chacun de ces critères sera présenté indépendamment.

## 5.2 Le critère de perpendicularité

### 5.2.a) Conditions de montage



Soit à assembler les deux pièces du dessin ci-dessus. Les faces A de l'arbre et B de l'alésage doivent venir en appui l'une sur l'autre. Déterminer les tolérances de perpendicularité à respecter sur chacune des pièces si l'ajustement est 30 H7/f7.



**Figure 5.2:** Les conditions extrêmes d'assemblage  
 (a) condition maximum de matière  
 (b) condition minimum de matière

La figure 5.2 montre les deux cas extrêmes d'assemblage, conditions maximum et minimum de matière, où deux perpendicularités différentes sont permises sur les pièces. Le défaut de perpendicularité acceptable est celui de la condition maximum de matière (figure 5.2.a) car, avec ce défaut, tous les diamètres possibles dans les tolérances de l'arbre et de l'alésage s'emboîtent. Au contraire au défaut de perpendicularité correspondant à la condition minimum de matière (figure 5.2.b), les deux pièces s'emboîtent seulement et si elles restent à cette condition. LA CONDITION AU MAXIMUM DE MATIERE est donc la condition à partir de laquelle les plus grands défauts de perpendicularité permis peuvent être calculés afin que le montage soit toujours possible.

Le jeu minimal de cet ajustement est 20  $\mu\text{m}$  (figure 5.1.a). Cette valeur étant négligeable par rapport aux dimensions nominales (30 et 28 mm),  $\alpha$  l'angle de défaut de perpendicularité est négligeable, c'est pourquoi J min peut être mesuré parallèlement aux deux faces d'appui (figure 5.2.a).

Comme le montre la figure 5.2.a, x est le défaut de perpendicularité de l'arbre et y celui de l'alésage, ils s'expriment comme suit:

$$J_{\min} = x + y$$

et se formule ainsi

"La somme des tolérances de perpendicularité est égale à  $J_{\min}$  de l'ajustement".

Si la même valeur  $t$  de défaut de perpendicularité est posée aux deux pièces:

$$x = y = \frac{J_{\min}}{2} = \frac{D_{\min} - d_{\max}}{2} = \frac{20}{2} = 10 \mu\text{m} = t \quad (5.1)$$

où  $t$  est le même défaut de perpendicularité des deux pièces définies à l'ajustement de la figure 5.3.

#### 5.2.b) Cotation et symbole

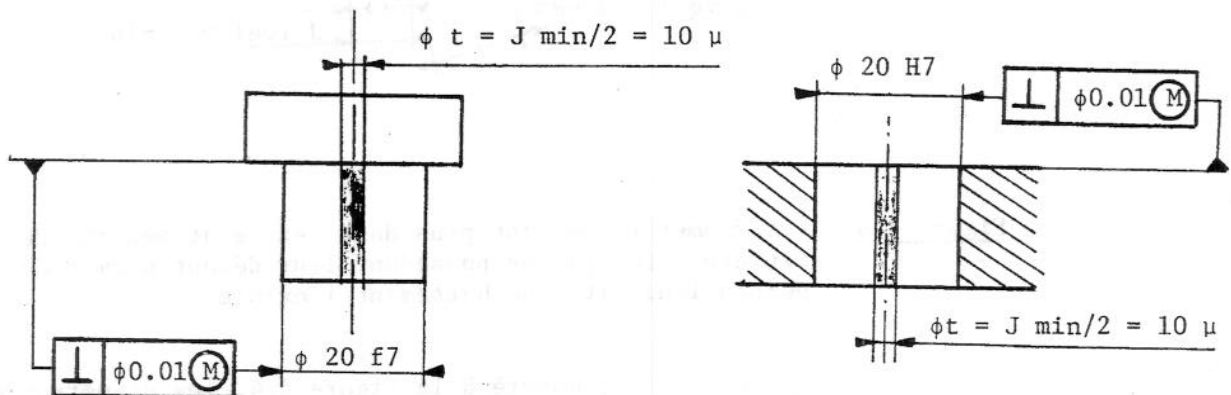
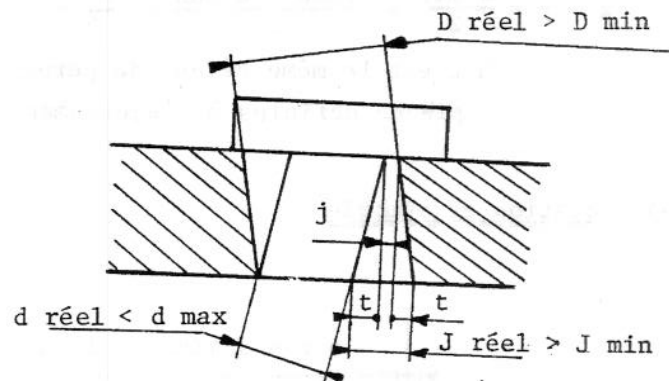


Figure 5.3: Dessin de définition des pièces. Le symbole  $(M)$  signifie que la perpendicularité tolérée correspond à la condition de MAXIMUM DE MATIERE.

Les deux pièces de l'exemple sont définies à la figure 5.3. Les diamètres sont cotés tel que l'ajustement le requiert. Les défauts de perpendicularité,  $\phi t$  obtenus à l'équation 5.1, sont également mentionnés. Le symbole  $(M)$  à la suite de  $t_{\max}$  signifie que la tolérance de perpendicularité a été déterminée en considérant les pièces dans leur état maximal de matière.

### 5.2.c) Principe du maximum de matière

Que se passe-t-il si les cotes des pièces ne sont pas dans leur état maximal de matière tout en demeurant à l'intérieur de leurs tolérances? Le jeu réel est alors supérieur au jeu minimum  $J_{\min}$ .



**Figure 5.4:** Les diamètres ne sont plus dans leur état maximal de matière. Les pièces possèdent leur défaut permis de perpendicularité. Un battement  $j$  existe.

Dans ce cas, montré à la figure 5.4, les diamètres ne sont plus dans leur état maximal de matière:  $D_{\text{réel}} > D_{\min}$  et  $d_{\text{réel}} < d_{\max}$ . Si chaque pièce possède les défauts de perpendicularité cotés à la figure 5.3, l'ensemble aura un jeu de battement  $j$  égal à :

$$j = (d_{\max} - d_{\text{réel}}) + (D_{\text{réel}} - D_{\min}) \quad (5.2)$$

Le principe du maximum de matière signifie que le montage des deux pièces est encore possible avec des tolérances de perpendicularité supérieures à  $t$  calculé à l'état maximal de matière. La somme de ces deux accroissements tolérés de perpendicularité ne doit être supérieur à  $j$ . L'équation 5.1 s'écrit:

$$x + y = J_{\text{réel}} \quad (5.3)$$

La cotation de la figure 5.3 n'est toutefois pas changée.



#### 5.2.d) Résumé

- 1- La condition au maximum de matière signifie que la cote du contenant est minimale et celle du contenu maximale. Le jeu est donc minimal.
- 2- La condition au maximum de matière est la condition à partir de laquelle les défauts minimums de position permis peuvent être calculés afin de pouvoir monter toujours les deux pièces.
- 3- Le symbole  $\textcircled{M}$ , maximum de matière indiqué dans la cotation géométrique, signifie:
  - que la tolérance de position mentionnée a été déterminée lorsque les pièces sont dans leur état maximal de matière.
  - qu'il autorise un dépassement limité de la tolérance de perpendicularité si les pièces ne sont pas dans l'état maximal de matière.

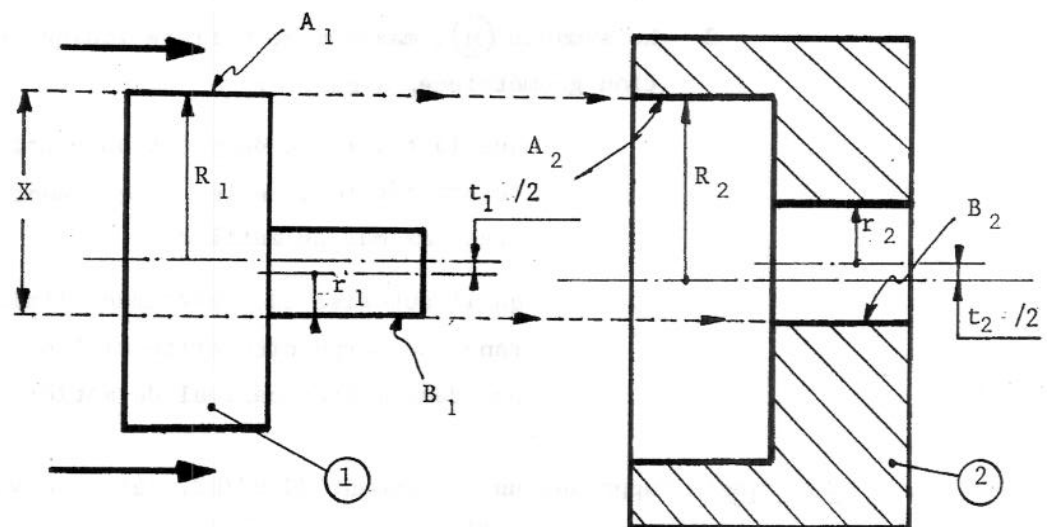
Remarque: Supposons un ajustement 30 H7/h8, les intervalles de tolérance de l'arbre et de l'alésage tangentent inférieurement et supérieurement la cote nominale. Le jeu minimal est donc nul. Dans ce cas, la tolérance permise de perpendicularité est nulle.

La valeur de tolérance permise de perpendicularité, calculée à l'état maximal de matière, dépend du jeu minimum ( $J_{\min}$ ).

### 5.3 Le critère de coaxialité

#### 5.3.a) Conditions de montage

Soit les deux pièces 1 et 2 de la figure 5.5 comprenant des diamètres concentriques qui doivent se monter les uns dans les autres malgré leur disposition critique montrée à la figure 5.5. Les ajustements  $R_1/R_2$  et  $r_1/r_2$  sont respectivement  $\phi 45 \text{ H8/f7}$  et  $\phi 20 \text{ H8/g6}$ .



**Figure 5.5:** Deux pièces concentriques à assembler. Les pièces sont à leur état maximal de matière.

Calcul des jeux mini et maxi (table 1 et 2, fin du chapitre # 1)

Ajustement  $R_1/R_2$  =  $\phi 45 \text{ H8/f7}$ ,

$$\begin{array}{rcl} \phi 45 \text{ H8} & = & 45 \begin{array}{l} +39 \\ 0 \end{array} \\ \phi 45 \text{ f7} & = & 45 \begin{array}{l} -25 \\ -50 \end{array} \end{array}$$

$$\text{jeu maxi} = 89 \mu = 0.089 \text{ mm}$$

$$\text{jeu mini} = 25 \mu = \underline{\underline{0.025 \text{ mm}}}$$

Ajustement  $r_1/r_2$  =  $\phi 20 \text{ H8/g6}$

$$\begin{array}{rcl} \phi 20 \text{ H8} & = & 20 \begin{array}{l} +33 \\ 0 \end{array} \\ \phi 20 \text{ g6} & = & 20 \begin{array}{l} -7 \\ -20 \end{array} \end{array}$$

$$\text{jeu maxi} = 53 \mu = 0.053 \text{ mm}$$

$$\text{jeu mini} = 7 \mu = \underline{\underline{0.007 \text{ mm}}}$$

Les deux pièces 1 et 2 sont montrées dans les conditions les plus défavorables permettant toujours leur assemblage. Ces conditions sont :

- les ajustements sont dans leur état maximal de matière (contenants mini et contenus maxi qui donnent les jeux minimaux)
- les défauts de coaxialité  $t_1$  et  $t_2$  sont les plus grands.

Considérons l'assemblage critique où les génératrices ( $A_1, A_2$ ) et ( $B_1, B_2$ ) viennent en contact deux à deux. Puisque ces génératrices sont confondues, la dimension  $X$  peut s'exprimer différemment sur les deux pièces :

$$\text{Pièce 1: } X = R_1 + r_1 + (t_1/2)$$

$$\text{Pièce 2: } X = R_2 + r_2 - (t_2/2)$$

Ces deux expressions s'égalent pour donner :

$$\frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} = (R_2 - R_1) + (r_2 - r_1)$$

$$t_1 + t_2 = (2R_2 - 2R_1) + (2r_2 - 2r_1)$$

$$t_1 + t_2 = JR_{\min} + Jr_{\min} \quad (5.4)$$

où  $JR_{\min}$  et  $Jr_{\min}$  sont respectivement les jeux minimaux du grand et petit ajustements.

L'équation 5.4 s'exprime comme suit :

"La somme des tolérances de coaxialité est égale à la somme des jeux minimaux des ajustements composant l'assemblage."

Dans l'exemple de la figure 5.5,  $t_1 + t_2 = 0.025 + 0.007 = 0.032$  mm.

La pièce 1 (arbre) étant plus facile à réaliser que la pièce 2, cette dernière se verra attribuée une tolérance double :

$$t_1 = 0.011 \text{ mm (pièce mâle)}$$

et  $t_2 = 0.021 \text{ mm (pièce femelle)}$

### 5.3.b) Symbolisation

Les deux pièces cotées sont dessinées à la figure 5.6.  
Le symbole  $\textcircled{M}$ , tout comme pour le critère de perpendicularité, signifie que:

- les tolérances de coaxialité ont été déterminées en supposant les pièces dans leur état maximal de matière.
- un dépassement limité de tolérance de coaxialité est autorisé si les pièces ne sont pas à l'état maximal de matière. Dans ce cas,

$$t_1 + t_2 = JR \text{ réel} + Jr \text{ réel}$$

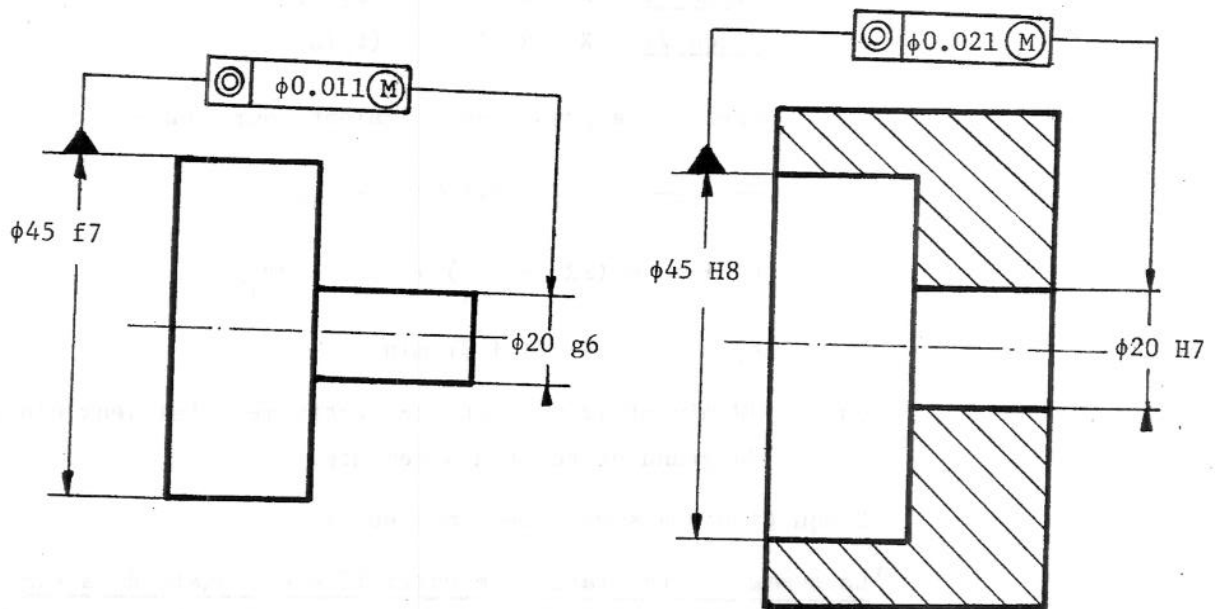
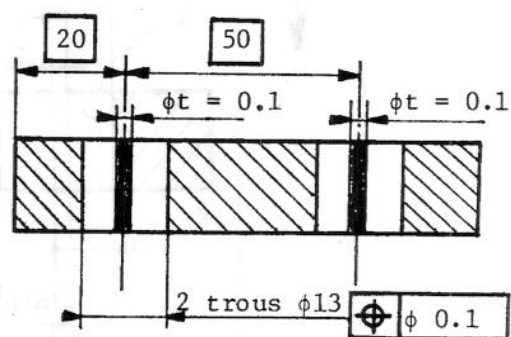


Figure 5.6: Dessin de définition des pièces. Le symbole  $\textcircled{M}$  signifie que les tolérances de coaxialité ont été calculées à l'état maximal de matière.

## 5.4 Le critère de localisation

### 5.4.a) Rappel

Le croquis suivant résume l'application des tolérances de localisation présentées au chapitre # 3.



Les axes des deux trous  $\phi 13$  doivent être compris dans deux cylindres de  $\phi t = 0.1$  centrés aux positions théoriques données par les cotes nominales 20 et 50 encadrées.

#### 5.4.b) Conditions de montage

Soit les deux pièces 1 et 2 de la figure 5.7 qui doivent s'emboîter l'une dans l'autre malgré leur disposition critique où les alésages sont rapprochés et les arbres éloignés.

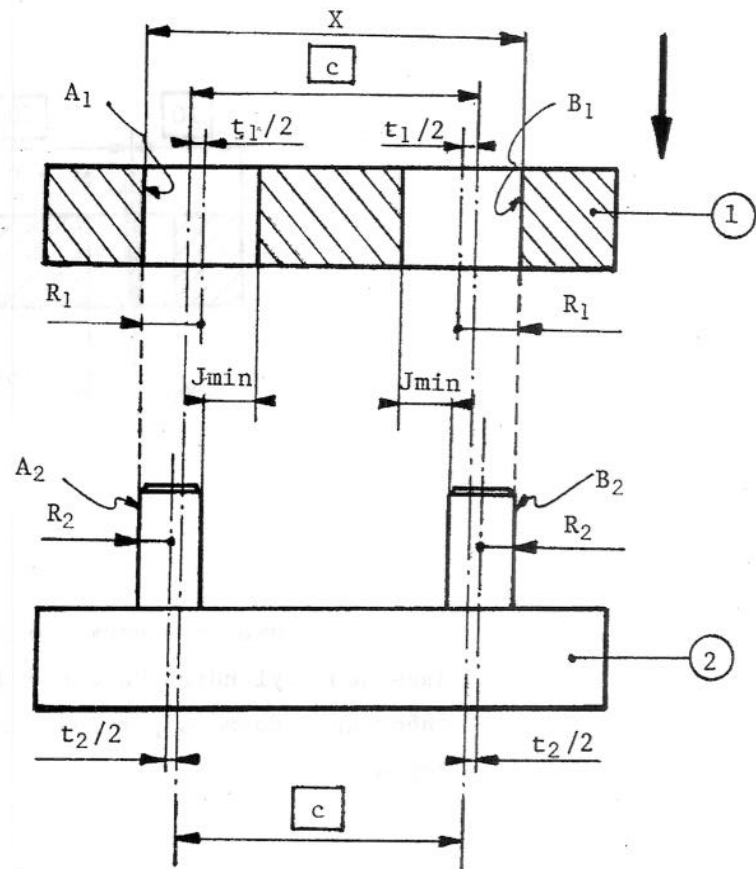


Figure 5.7: Ces deux pièces sont à emboîter. Les diamètres et les arbres ont la même cote de localisation  $c$ . Les pièces sont à leur état maximal de matière.

La pièce 1 possède deux alésages  $\phi 16$  H8 distants axe à axe de la cote encadrée  $c$  avec la tolérance de localisation  $t_1$ . La pièce 2 comprend deux diamètres  $\phi 16$  e9 distants axe à axe de la même cote  $c$  avec la tolérance de localisation  $t_2$ .

Les deux pièces sont montrées dans les conditions les plus défavorables permettant toujours leur assemblage. Ces conditions sont :

- les ajustements sont dans leur état maximal de matière, ce qui donne les jeux minimaux  $J_{\min}$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Comme } 16 \text{ H}8 = 16 \begin{smallmatrix} +27 \\ 0 \end{smallmatrix} \\ \text{et } 16 \text{ e}9 = 16 \begin{smallmatrix} -32 \\ -75 \end{smallmatrix} \end{array} \right\} \begin{array}{l} J_{\min} = D_{\min} - d_{\max} = 16.0 - 15.968 = 0.032 \text{ mm} = 32 \text{ } \mu\text{m} \end{array}$$

- les pièces sont à leur défaut de localisation maximum,  $t_1$  et  $t_2$ , avec les alésages rapprochés et les arbres éloignés.

Conformément à ces conditions défavorables, la figure 5.7 montre les pièces d'après leur assemblage extrême où les génératrices ( $A_1, B_1$ ) et ( $A_2, B_2$ ) viennent respectivement se confondre. La cote  $X$  séparant ces génératrices peut s'exprimer séparément sur les deux pièces.

Pièce 1:  $X = c - t_1 + 2R_1$

Pièce 2:  $X = c + t_2 + 2R_2$

Ces deux expressions s'égalent pour donner:

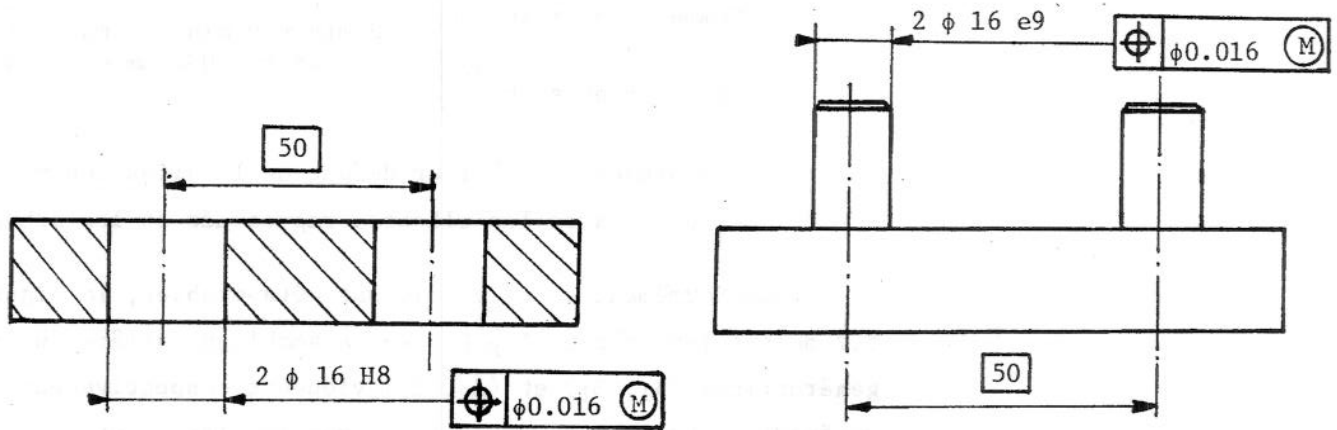
$$t_1 + t_2 = 2R_1 - 2R_2 = J_{\min} = 32 \text{ } \mu\text{m} \quad (5.5)$$

"La somme des tolérances de localisation de deux éléments conjugués (arbre, alésage, rainure) est égale au jeu minimal de l'ajustement de base."

Important: Pour étudier l'assemblage de deux pièces, il faut

- 1) que tous les ajustements soient à leur état maximum de matière
- 2) considérer le cas limite LE PLUS DÉFAVORABLE permettant toujours le montage des deux pièces.

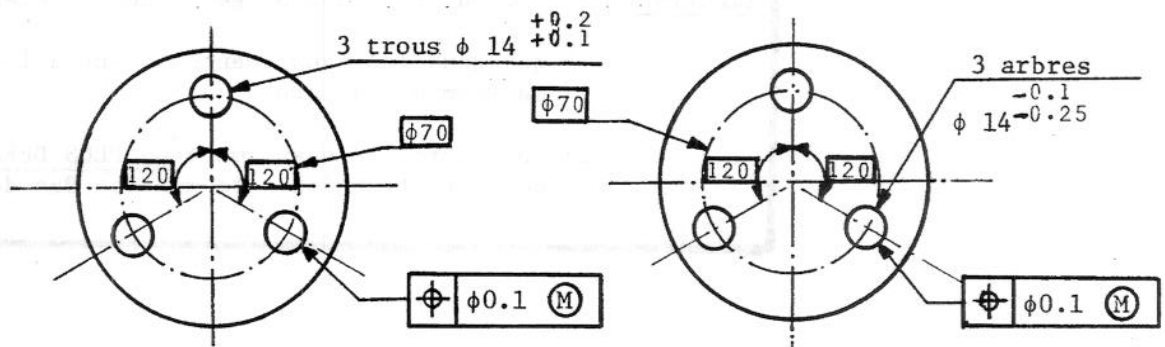
Dans l'exemple de la figure 5.7,  $t_1 = t_2 = 16 \mu\text{m}$ . Cette tolérance de localisation est indiquée sur le dessin de définition de chacune des deux pièces, tel que le montre la figure 5.8.



**Figure 5.8:** Dessin de définition des pièces. Le symbole (M) signifie que les tolérances de localisation mentionnées ont été calculées à l'état maximal de matière.

Tout comme avec les autres critères de position, le principe du maximum de matière autorise un dépassement de la tolérance de localisation si les trous et l'alésage ne sont plus aux conditions de maximum de matière.

#### 5.4.c) Autres applications : Trois ajustements équidistants



**Figure 5.9:** Localisation de trois ajustements équidistants. La pièce mâle (b) doit se monter dans la pièce femelle (a).



La figure 5.9 montre deux pièces cotées à assembler. Notez que la somme des tolérances de localisation est égale au jeu minimum de l'ajustement de base, soit 0.2 mm. Les cotés encadrés peuvent également être des angles.

\* Avantage de l'emploi de boulons au lieu de vis

A la figure 5.10, une vis (a) et un boulon (b) assurent la même fonction d'assemblage.

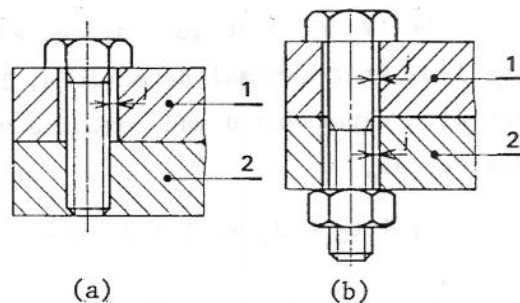


Figure 5.10: Assemblage de deux plaques par (a) vis et (b) boulon.  $j$  est le jeu radial.

Le jeu radial  $j$  de la figure 5.10.a existe entre la vis et seulement la pièce 1. L'équation 5.5 s'écrit:

$$t_1 + t_2 = J_{\min} = 2j = \text{jeu diamétral} \quad (1)$$

Le jeu radial  $j$  de la figure 5.10.b existe entre le boulon et les deux pièces à la fois. L'équation 5.5 devient:

$$t_1 + t_2 = 2J_{\min} = 4j \quad (2)$$

La comparaison des équations (1) et (2) montre que l'assemblage par boulon au lieu de vis permet d'avoir pour chaque plaque une tolérance de localisation double. Noter également qu'un assemblage par boulon ne requiert pas de taraudage dans une des plaques.

## 5.5 Le critère de symétrie

L'étude du critère de symétrie est identique à celle du critère de coaxialité. L'exemple de la figure 5.5 donne des résultats identiques s'il est traité sous l'approche de symétrie.

Ces résultats se formulent:

$$t_1 + t_2 = J_1 \text{ min} + J_2 \text{ min} \quad (5.6)$$

où  $J_1 \text{ min}$  et  $J_2 \text{ min}$  sont respectivement les jeux minimaux des ajustements 1 et 2 devant être symétriques.

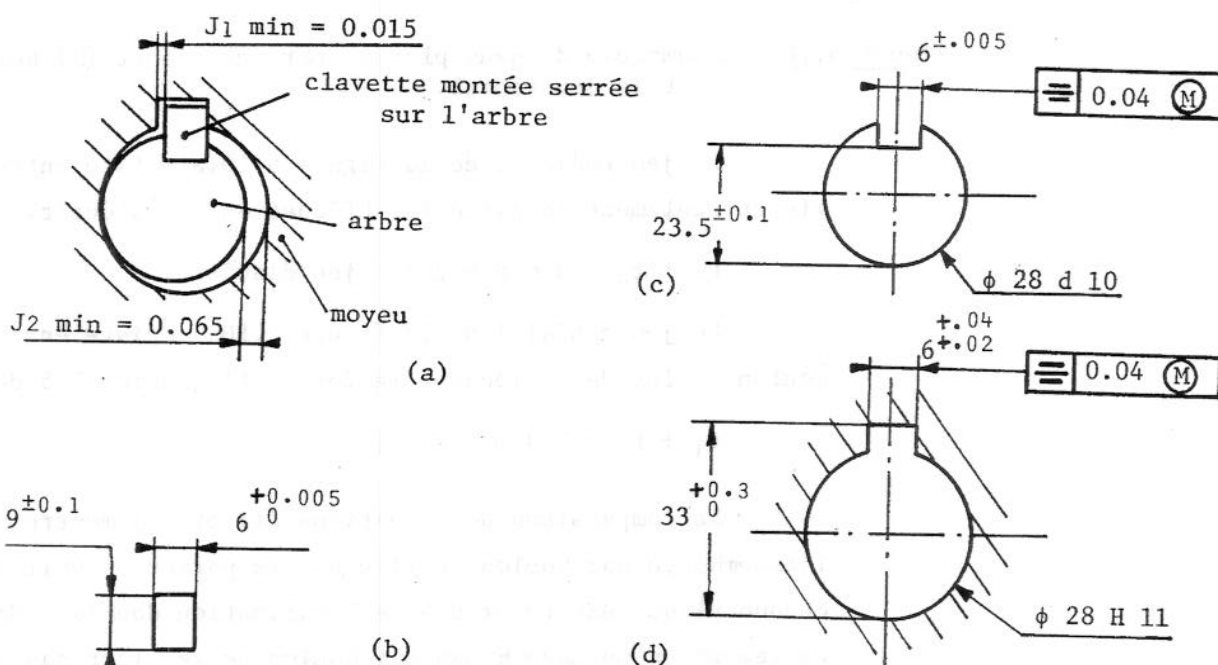
L'équation 5.6 se formule comme suit:

La somme des tolérances de symétrie est égale à la somme des jeux minimaux des ajustements.

De façon identique, si les éléments concernés ne sont pas dans leur état maximal de matière, les tolérances de symétrie peuvent être dépassées d'une certaine valeur en fonction du jeu réel. Dans ce cas,

$$t_1 + t_2 = J_1 \text{ réel} + J_2 \text{ réel}$$

Exemple: Montage d'une clavette pour transmettre un couple



**Figure: 5.11:** Etude de la symétrie d'un arbre et de son moyeu liés en rotation par une clavette.  
 (a) assemblage à l'état maximal de matière  
 (b) dessin de définition de la clavette  
 (c) dessin de définition de l'arbre  
 (d) dessin de définition du moyeu

Cet assemblage comprend deux ajustements de jeux minimaux 0.015 et 0.065 mm. D'après l'équation 5.6, ces deux valeurs permettent de distribuer les tolérances de symétrie entre l'arbre et le moyeu.

$$t_1 + t_2 = 0.015 + 0.065 = 0.080$$

Posons les tolérances réparties équitablement.

$$t_1 = t_2 = 0.040 \text{ mm tel que coté sur les dessins de définition.}$$

### 5.6 Les contrôles

Quel que soit le critère de position considéré, les pièces à vérifier comportent des cotes dimensionnelles (20H8, 45 g7,...) et des cotes géométriques (coaxialité, ...). En métrologie, ces deux types de cotations demandent deux contrôles distincts soit le contrôle dimensionnel et le contrôle géométrique qui devront impérativement avoir lieu dans l'ordre présenté à la figure 5.12.

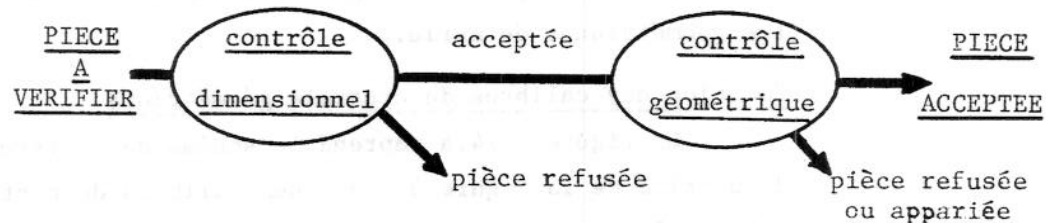
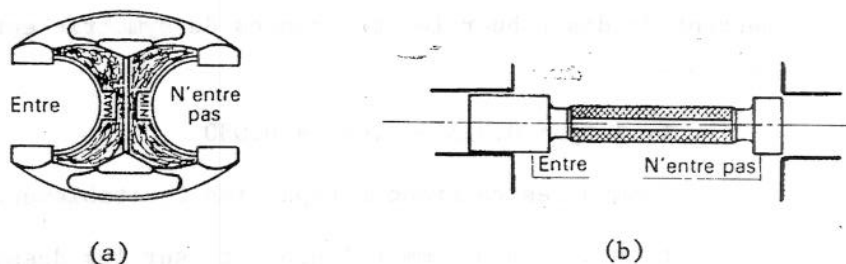


Figure 5.12: Séquence de contrôle des pièces comportant une cotation au maximum de matière.

#### 5.6.a) Le contrôle dimensionnel

Dans l'étude de la cotation au maximum de matière, les dimensions des pièces ont toujours été considérées à l'intérieur de leur intervalle de tolérance. Le premier contrôle à réaliser en métrologie est donc le contrôle dimensionnel tel que le montre la séquence de la figure 5.12. Si la pièce ne répond pas positivement à ce contrôle, elle doit être rejetée. En contrôle de série, des calibres ou tampons "entre-n'entre pas" sont utilisés pour vérifier les cotes tolérancées. (voir figure suivante 5.13)



**Figure 5.13:** Contrôle dimensionnel "entre - n'entre pas"

- a) le calibre à mâchoires vérifie des arbres.
- b) le tampon vérifie des alésages.

#### 5.6.b) Le contrôle géométrique

Ce deuxième contrôle est pratiqué seulement si le premier contrôle, dimensionnel, s'est avéré positif. Des calibres "entre - n'entre pas" sont également fabriqués pour les contrôles géométriques de série.

#### Cotation des calibres de contrôle géométrique

La figure 5.14.a reprend le schéma du critère de perpendicularité de la figure 5.2.a. Les calibres de contrôle, des pièces mâle et femelle, sont tous deux fabriqués au même diamètre nominal  $D_c$  qui est la position de référence commune aux deux défauts x et y. La ligne L qui fixe le diamètre  $D_c$  détermine:

- $D_c$ , une cote contenue qui vérifiera le défaut de l'alésage.
- $D_c$ , une cote contenant qui vérifiera le défaut de l'arbre.

Les ensembles des pièces à monter sont donc vérifiées de part et d'autre de la même ligne L. Tout un lot de pièces mâles acceptées s'assemblera donc avec tout un lot de pièces femelles acceptées.

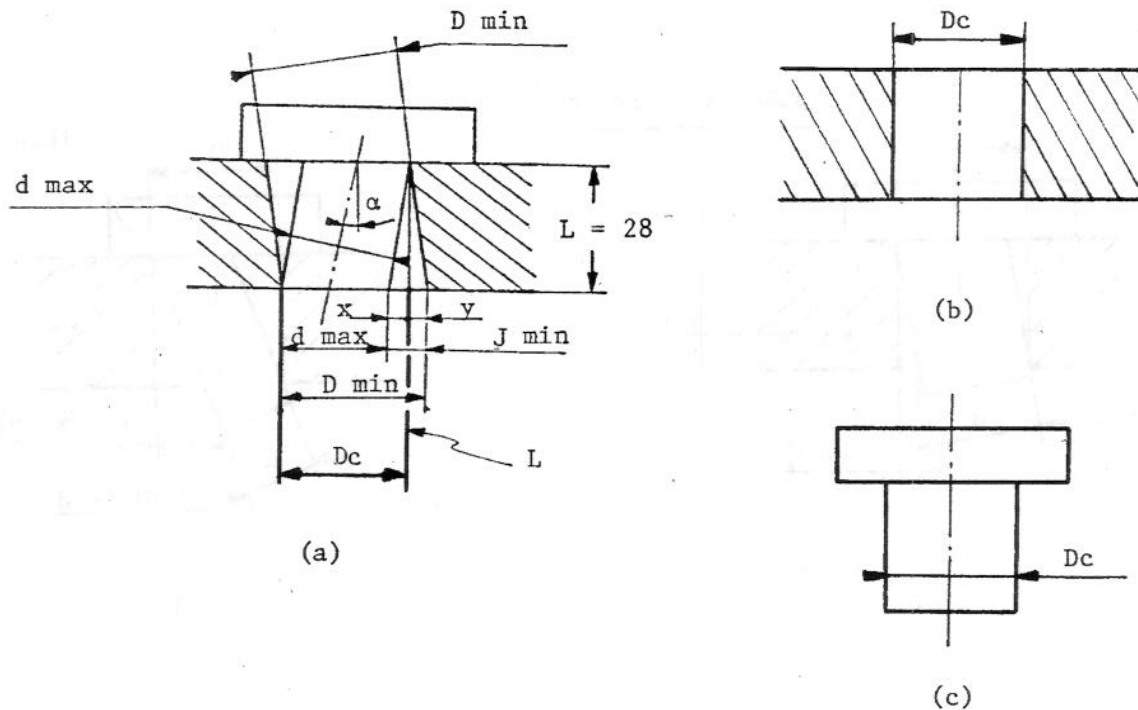
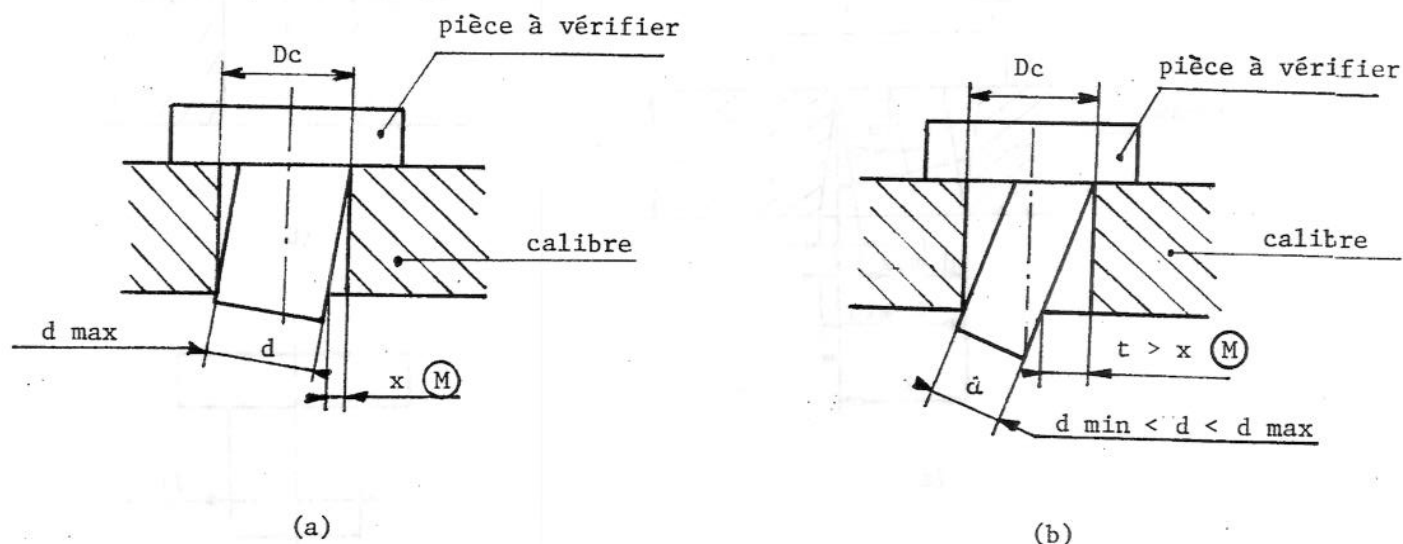


Figure 5.14: a) Le critère de perpendicularité. Chacune des pièces est vérifiée géométriquement par rapport au diamètre  $D_c$  qui sépare les défauts  $x$  et  $y$  des deux pièces.  
 b) Calibre de l'arbre avec défaut de perpendicularité quasi nul.  
 c) Calibre de l'alésage avec défaut de perpendicularité quasi nul.

$$\text{D'après la figure 5.14.a, } D_c = d_{\max} + x = D_{\min} - y \quad (5.7)$$

Les calibres sont fabriqués avec des tolérances dimensionnelles et géométriques très étroites, de l'ordre du micromètre ( $\mu\text{m}$ ). Le défaut géométrique est quasi nul. Des compagnies possédant des machines-outils de très grande précision sont spécialisées dans la fabrication de tels calibres.

\* Le principe du maximum de matière signifie qu'un dépassement limité de la tolérance de position est autorisée si les pièces ne sont pas dans l'état maximal de matière. La figure 5.15 montre que les calibres tel que présentés ci-dessus tiennent compte du principe du maximum de matière.



**Figure 5.15:** Le calibre fabriqué au diamètre  $D_c$  vérifie la pièce d'après le principe du maximum de matière.

A la figure 5.15.a, la pièce à vérifier est dans son état maximal de matière ( $d = d_{max}$ ). Le défaut de perpendicularité maximum permis est alors  $x$  (M), défaut calculé dans l'état maximal de matière.

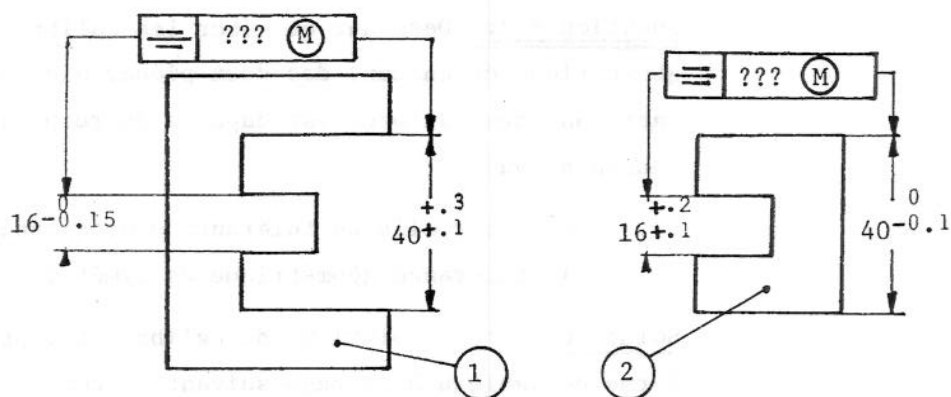
La figure 5.15.b illustre le principe de maximum de matière. La pièce à vérifier n'est plus dans son état maximal de matière tout en étant dans ses tolérances dimensionnelles ( $d_{min} < d < d_{max}$ ). Par rapport au diamètre  $D_c$  du calibre, le nouveau défaut de perpendicularité maximum permis sera maintenant  $t$  supérieur à  $x$  (M).

\* La figure 5.12 mentionne la séquence de contrôle des pièces. Une pièce classée défectueuse lors du contrôle géométrique peut être refusée ou appariée. En effet une pièce mâle qui excéderait le diamètre  $D_c$  peut être assemblée avec une pièce femelle qui n'excéderait pas  $D_c$  et vice-versa.

De façon générale, le calibre "entre - n'entre pas" pour le contrôle géométrique aura:

- la forme réciproque de la pièce à vérifier.
- un défaut de position quasi nul.
- des cotes correspondant au maximum de matière de la pièce à vérifier amplifié de la tolérance géométrique cotée sur la même pièce (Equation 5.7).

La règle énumérée ci-dessus est illustrée à travers un exemple impliquant le critère de symétrie. Les deux pièces dessinées ci-dessous sont à assembler.



Question # 1: Quelles tolérances de symétrie doivent être imposées aux deux pièces présentées ci-dessus?

Solution: D'après l'équation 5.6 (page 118)

$$t_1 + t_2 = J_1 \text{ min} + J_2 \text{ min} = 0.1 + 0.1 = 0.2 \text{ mm.}$$

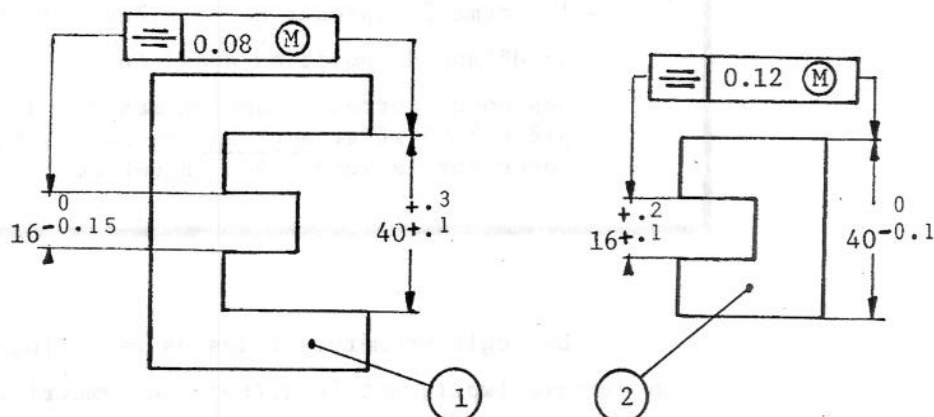
où  $t_1$  et  $t_2$  sont respectivement les tolérances de symétrie des pièces 1 et 2.

Pour des raisons de fabrication, les intervalles de tolérance au maximum de matière,  $t_1$  et  $t_2$ , sont répartis entre les deux pièces comme suit:

$$t_1 = 0.08 \text{ mm}$$

$$t_2 = 0.12 \text{ mm}$$

La cotation de symétrie sera donc la suivante:



Question # 2: Dessiner et coter les calibres de contrôle géométrique de chacune des deux pièces ainsi cotées. Le fabricant des calibres est capable de respecter les tolérances suivantes:

$\epsilon$ ; intervalle de tolérance dimensionnelle ( $\approx 1 \mu\text{m}$ )

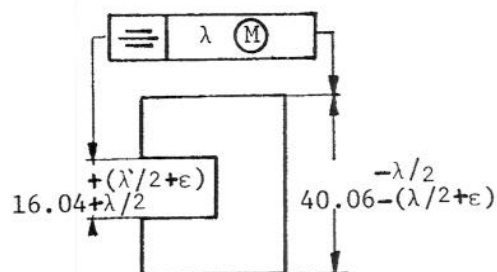
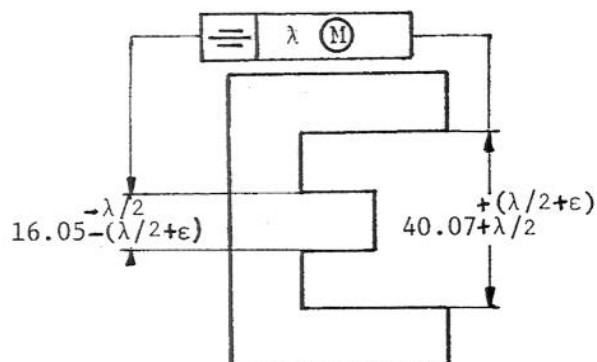
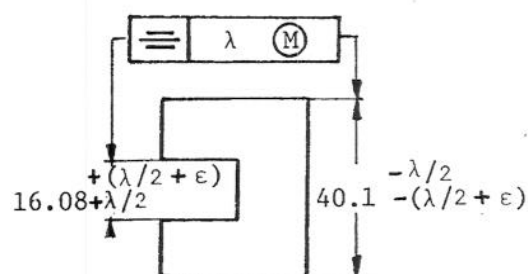
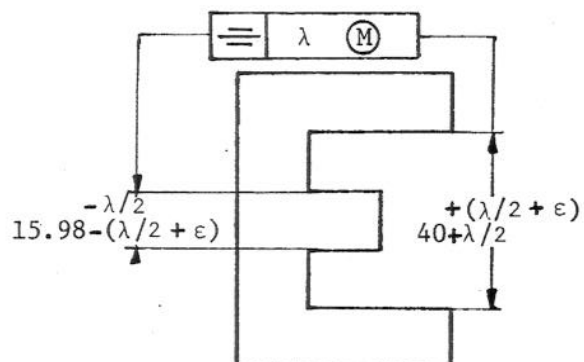
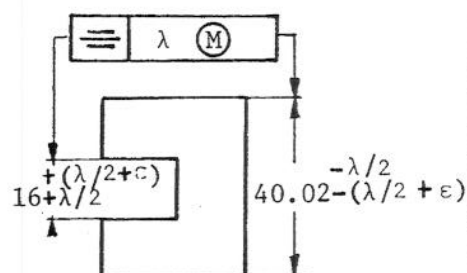
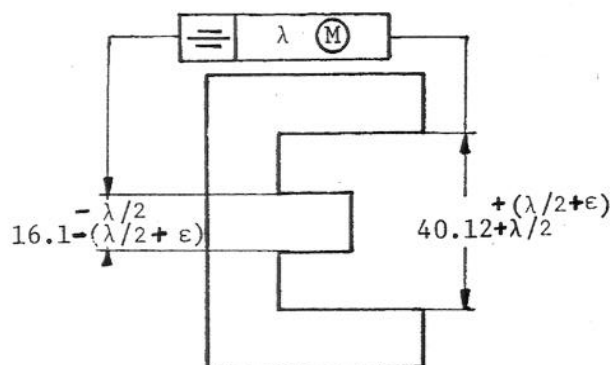
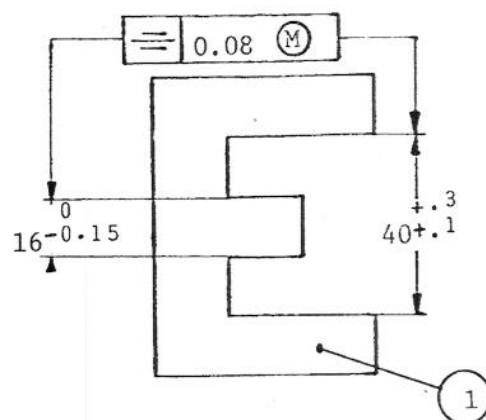
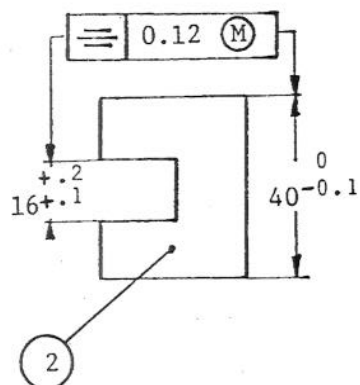
$\lambda$ ; tolérance géométrique de symétrie ( $\approx 0.2 \mu\text{m}$ )

Solution: Trois solutions de calibre sont présentées sous forme de tableau à la page suivante. Noter bien que les cotes des calibres correspondent au maximum de matière de la pièce à vérifier amplifié de l'intervalle de la tolérance de symétrie de la même pièce. La tolérance de symétrie peut être répartie indifféremment sur une ou les deux cotes du calibre.

Remarquer également que les intervalles des calibres,  $\epsilon$  et  $\lambda$ , sont posés dans le sens d'amplifier toujours l'état maximum de matière de la pièce à vérifier.

Quant à la tolérance de symétrie du calibre, elle est obtenue d'après l'équation 5.6 où maintenant les deux pièces à assembler sont le calibre et la pièce à vérifier dans leur état maximum de matière.







## CHAPITRE VI

### OBTENTION DES BRUTS

#### 6.1 Introduction

Des pièces mécaniques peuvent être appelées à être produites en:

- production unitaire ou quelques pièces (prototypes, montages spéciaux)
- production de série comprenant:
  - petite série (5 à 200 pièces)
  - moyenne série (200 à 1000 pièces)
  - grande série (1000 à 5000 pièces)
  - très grande série (plus de 5000 pièces)
- production par lots (ex: 50 pièces tous les deux mois)
- production continue en chaîne (ex: production automobile).

La grande majorité des pièces mécaniques sont usinées à partir d'une pièce brute appelée brut. Ce brut sera de forme plus ou moins complexe dépendant de son procédé d'obtention.

Le présent chapitre décrit sommairement les principes des plus courants procédés d'obtention de bruts sans trop entrer dans les détails techniques et métallurgiques. Des données utiles à l'usinage seront fournies telles que les états de surface, les tolérances dimensionnelles et géométriques des bruts avant usinage.

L'obtention des bruts peut se classer en trois grandes catégories:

- le moulage
- le formage plastique
- le frittage ou métallurgie des poudres.

#### 6.2 Le moulage

Le moulage se fait à partir du métal liquide qui est coulé dans une empreinte appelée moule ayant la forme réciproque du brut à obtenir.

### 6.2.a) Le moulage à moules non permanents

La figure 6.1 schématise les deux principaux principes de moulage à moules non permanents.

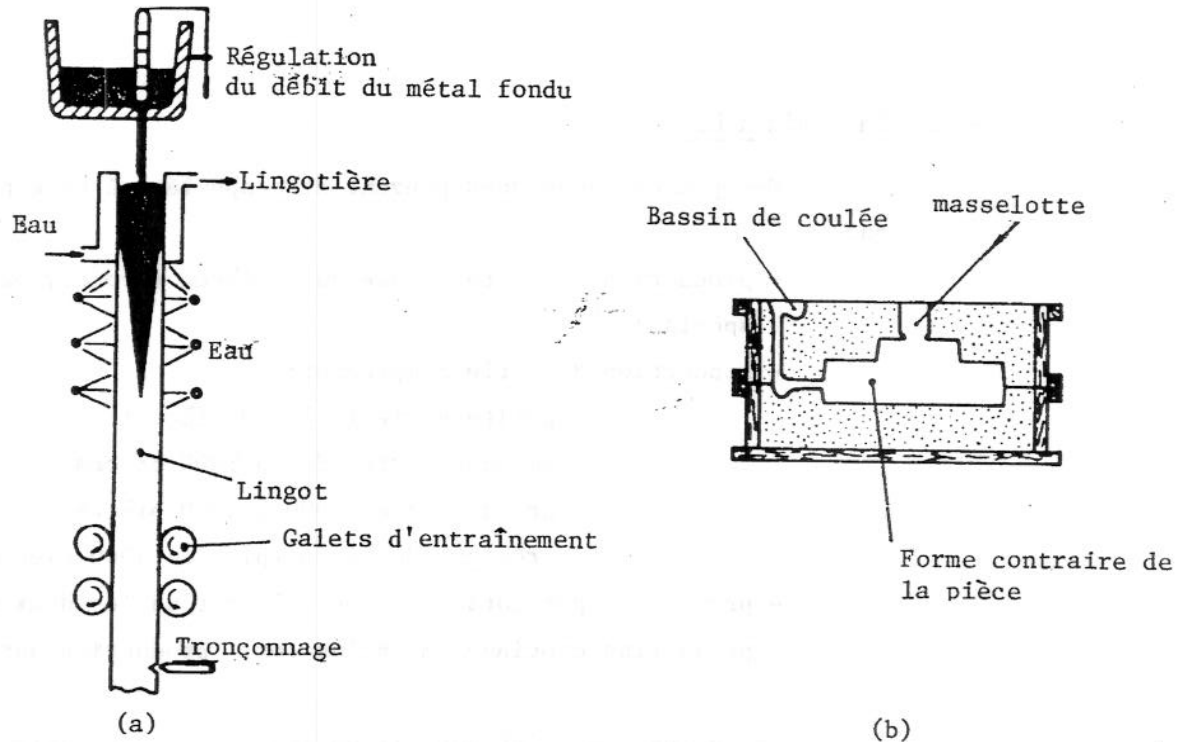


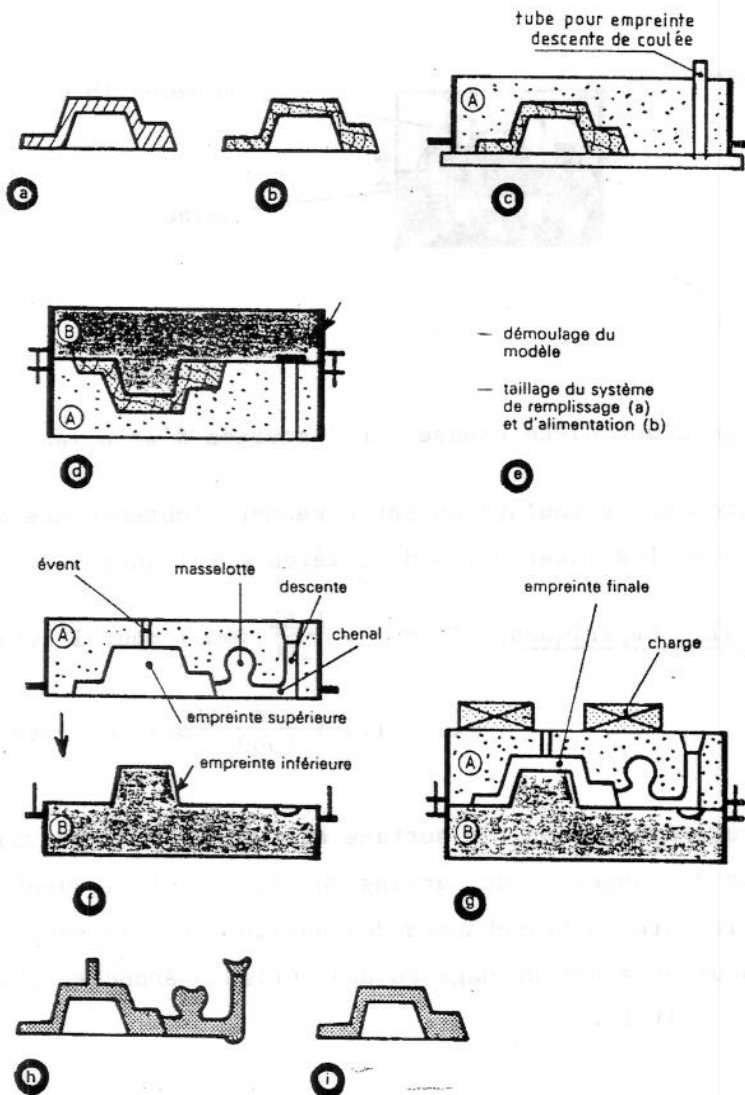
Figure 6.1: Les deux principaux principes de moulage à moules non permanents

Figure 6.1.a: Le métal liquide est versé dans un moule fixe appelé lingotière. Le métal coulé se présente sous forme de barre appelée lingot. Le lingot est refroidi par jets d'eau et tiré de la lingotière à vitesse constante. Le lingot tronçonné sera destiné à un usinage ou à un forgeage ultérieur.

Figure 6.1.b: Le moulage en sable: Le moule, fabriqué en sable, comprend deux parties afin de permettre le démoulage. Le métal liquide se répand dans la cavité interne. Les pièces obtenues sont quasiment à leur forme finale, seule des surfaces restent à usiner.

### A - Le moulage en sable

Le sable, de 5 à 7% d'humidité, est majoritairement composé de silice. Le procédé de moulage en sable s'adapte à presque toutes les formes de pièces possibles de 200 gr. à 4 tonnes. Les croquis de la figure 6.2 décrivent le principe:



- a - La pièce à obtenir.
- b - Un modèle en bois est réalisé.
- c - L'empreinte supérieure du moule est formée autour du modèle.
- d - L'empreinte inférieure est réalisée de la même façon.
- e - Les deux empreintes sont séparées et le modèle est retiré.
- f - Les deux empreintes sont réinstallées. Noter les conduits de coulée et d'évacuation d'air (évent). La masselotte a pour rôle de compenser les variations de volume au cours du refroidissement du métal.
- g - Le moule est prêt à recevoir la coulée.
- h - La pièce moulée est dégagée.
- i - Les traces des conduits sont meulés. La pièce finale comporte un plan de joint: joint des deux empreintes du moule.

Figure 6.2: Principe du moulage en sable.

Des pièces creuses peuvent également être obtenues par moulage au sable, la figure 6.3 montre le principe. Un noyau en sable, durci par des additifs, demeure dans le moule lors de la coulée. Une fois la pièce coulée démoulée, le noyau est retiré; la pièce finale est creuse.

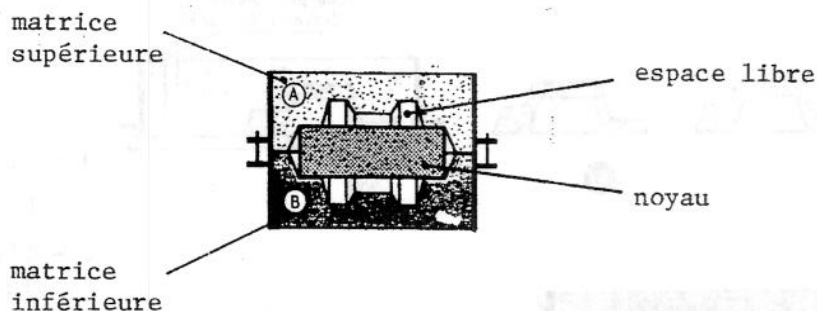


Figure 6.3: Moulage d'une pièce creuse par insertion d'un noyau.

Le procédé de moulage en sable permet d'obtenir des dimensions  $d$  avec les intervalles de tolérance suivants:

formules empiriques:  $IT = 1 + \frac{1.5d}{100}$  (mm.) pour l'acier

$$IT = 1.5 + \frac{5d}{1000} \text{ (mm.) pour les alliages légers}$$

La rugosité moyenne de surface est  $Ra \approx 12.5 \mu m$ . Les surfaces risquent de conserver des grains de silice qui risquent d'émousser les arêtes tranchantes des outils. Les surfaces peuvent être meulées avant usinage ou des outils d'ébauche robustes devront être choisis.

### B - Le moulage en carapace (shell molding)

Le sable siliceux est mélangé avec des résines thermodurcissables. La figure 6.4 schématise le principe de ce procédé.

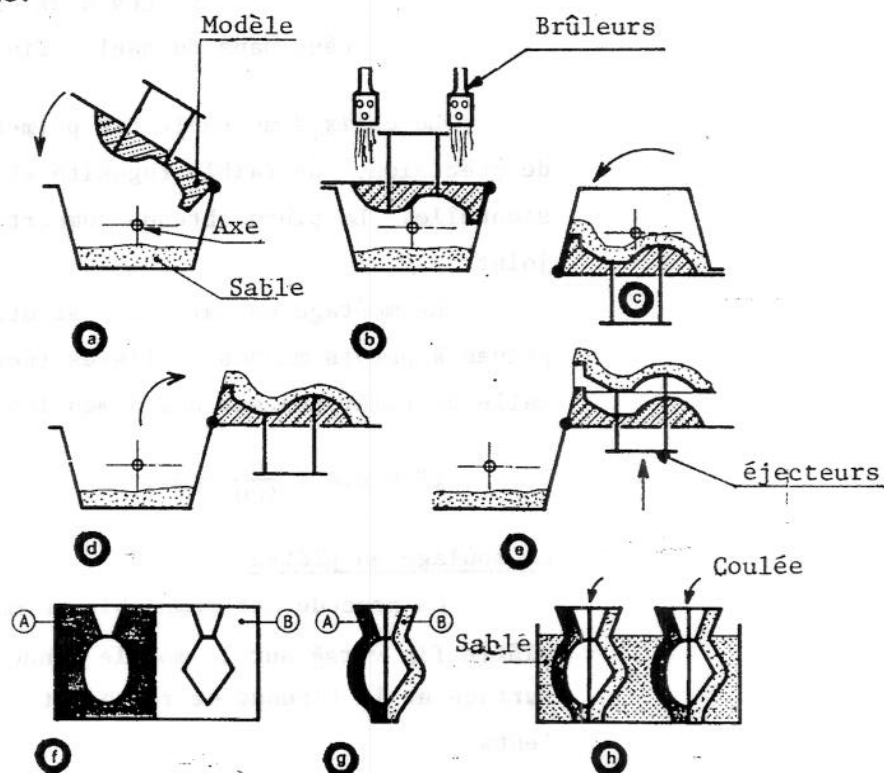


Figure 6.4: Principe du moulage en carapace.

Obtention de la carapace (a) Le modèle de la pièce est fixé sur le couvercle de la cuve qui peut pivoter autour d'un axe.

(b) Le couvercle est chauffé à 300°C environ.

(c) La cuve est retournée de 180 degrés. Le sable thermodurcissable vient se polymériser au contact du modèle chaud.

(d) La cuve est ouverte.

(e) Les éjecteurs permettent de dégager la carapace durcie du modèle. Plusieurs carapaces de diverses formes peuvent ainsi être obtenues suivant le même processus.

Moulage de la pièce

(f) Deux carapaces A et B forment les deux parties contraires de la pièce à réaliser.

(g) Les deux carapaces sont collées.

(h) Les deux carapaces collées sont placées dans du sable afin de recevoir la coulée.

Le choix d'un sable fin permet de réaliser des montages de précision, de faible rugosité et de bonne précision dimensionnelle. La pièce obtenue comportera également un plan de joint.

Le montage en carapace est utilisé entre autre pour les pièces à parois minces et lisses (nervures),  $Ra \approx 6.3 \mu m$ . L'intervalle de tolérance sur une dimension  $d$  est de l'ordre de:

$$IT = 0.4 + \frac{d}{100} \text{ (mm.)}$$

C - Le moulage au plâtre

Ce procédé est semblable au moulage en carapace. Du plâtre fin versé sur le modèle donne la carapace. L'état de surface et la finesse de reproduction des détails sont excellents.

Rugosité moyenne,  $Ra = 3.2 \mu m$ . La coulée peut se faire simplement par gravité ou sous pression.

D - Le moulage à cire perdue (à modèle perdu)

Ce procédé est surtout employé pour des pièces de dimensions moyennes, de formes complexes en alliages de mauvaise coulabilité. La figure 6.5 décrit la préparation des modèles.

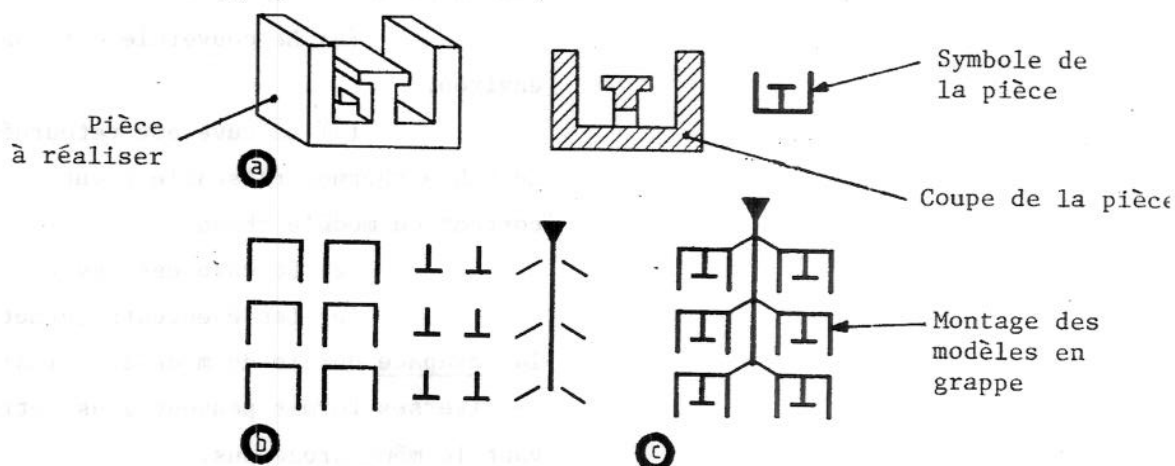


Figure 6.5: Préparation des modèles en cire.



(a) Les pièces à réaliser ont une forme non dégagée \* très difficile à obtenir par moulage en sable.

(b) Plusieurs parties du modèle sont fabriquées par injection de cire ou de polystyrène dans un moule simple.

(c) Ces parties sont assemblées sous forme de grappe comprenant plusieurs modèles de la pièce.

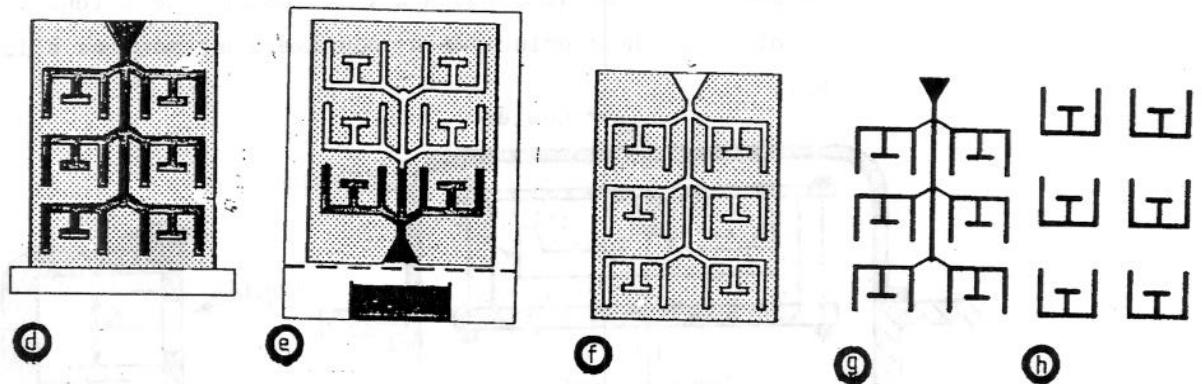


Figure 6.6: Fabrication du moule

(d) Le montage en grappe est enrobé de produits réfractaires par trempages, soupoudrages et séchages successifs. Une carapace de quelques millimètres est ainsi créée autour des modèles en cire. La grappe enrobée est ensuite placée dans un châssis rempli de sable fin.

(e) Le châssis retourné est placé dans un four où les modèles en cire fondent et s'écoulent. Il est important de prévoir que tout point du modèle ait une pente d'écoulement. Ce chauffage durcit également le produit réfractaire.

(f) Le métal liquide est coulé dans le moule chaud ce qui accroît la coulabilité de l'alliage.

(g) Le châssis est ouvert et la carapace brisée.

(h) Les pièces finies sont détachées de la grappe.

\* Une forme non dégagée signifie que la forme de la pièce ne peut pas directement être obtenue par moulage avec deux empreintes.

Les pièces n'ont pas de plan de joint

Les résultats de ce procédé sont excellents mais demandent beaucoup de manutention:

$$IT = 0.25 + \frac{5d}{1000} \text{ (mm.) et } Ra \approx 6.3 \mu\text{m}$$

#### E - Le moulage par centrifugation

Ce procédé est employé pour les pièces de révolution longues (ex: tuyaux, coussinets, chemises de moteur à explosion). Les deux principes de moulage sont montrés à la figure 6.7.

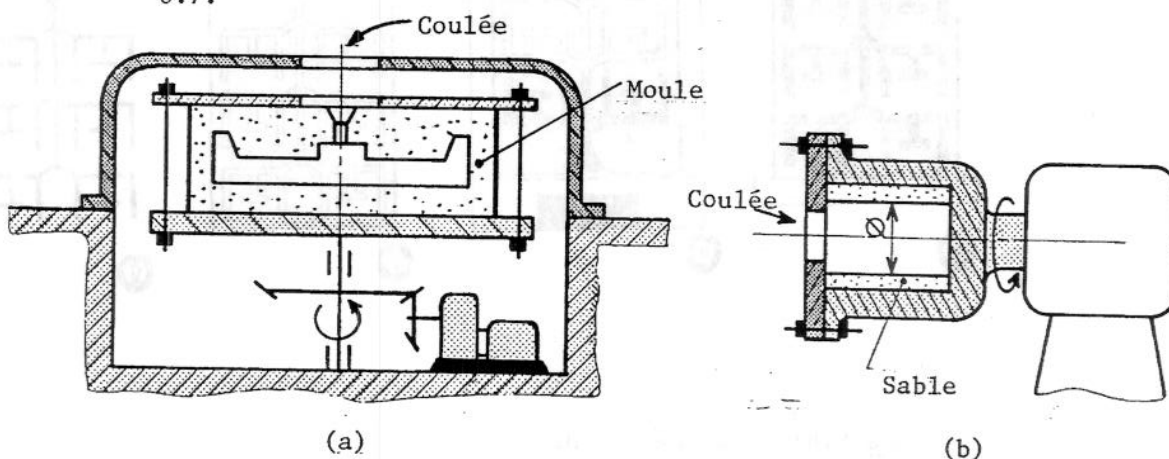


Figure 6.7: Le moulage par centrifugation. L'axe de rotation est (a) vertical ou (b) horizontal.

Le châssis du moule est bloqué sur le plateau d'une centrifugeuse qui peut donner une accélération centrifuge de plusieurs dizaines de g (g étant la pesanteur terrestre). Le métal est donc compacté vers l'extérieur. Eviter l'emploi de noyau axial.

Le châssis métallique doit être robuste. Les états de surface et tolérances sur les dimensions sont semblables à ceux du moulage en sable.

#### 6.2.b) Le moulage à moules permanents (en coquille)

Dans ce procédé, le moule comprend deux parties entièrement métalliques appelées coquilles. Les coquilles obtenues par moulage, déformation plastique ou usinage sont en fonte ou

en alliages de cuivre. A cause du coût élevé des coquilles, ce procédé peut être utilisé avantageusement à partir d'une série minimale de 2000 pièces.

Le métal peut être introduit dans les coquilles par gravité ou pression. La rugosité et les tolérances pour des alliages légers sont les suivants:

$$IT = 0.3 + \frac{3d}{1000} \text{ (mm.) et } Ra = 6.3 \text{ à } 3.2\mu\text{m}$$

Remarque importante: Les pièces moulées devant être usinées sont prévues avec une surépaisseur de 4 à 6 millimètres sur chaque surface à usiner.

### 6.3 Le formage plastique

#### 6.3.a) L'estampage - matricage

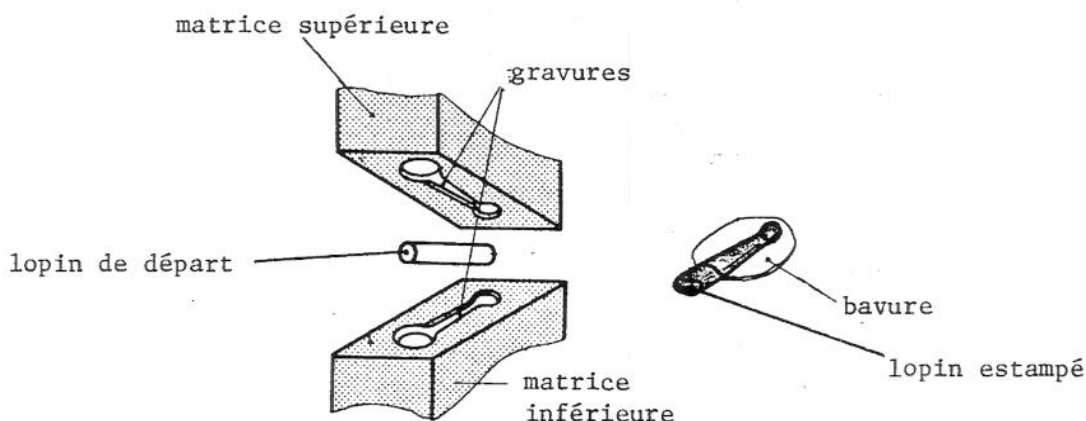


Figure 6.8: Principe du matricage

Une pièce métallique de forme simple (lopin) est intercalée entre deux blocs d'acier gravés appelés matrices. Les matrices sont rapprochées par impacts ou pression prolongée. Les chocs ont un effet superficiel sur la pièce alors que la pression prolonge son action jusqu'au coeur de la pièce.

Les matrices déforment plastiquement le lopin qui remplit leurs empreintes. Les matrices doivent prévoir l'évacuation latérale de l'excédant de métal sous forme de bavures.

L'opération d'estampage comprend souvent plusieurs étapes successives de formage. A la figure 6.9, une manivelle est estampée en trois étapes: cambrage, ébauche et finition.

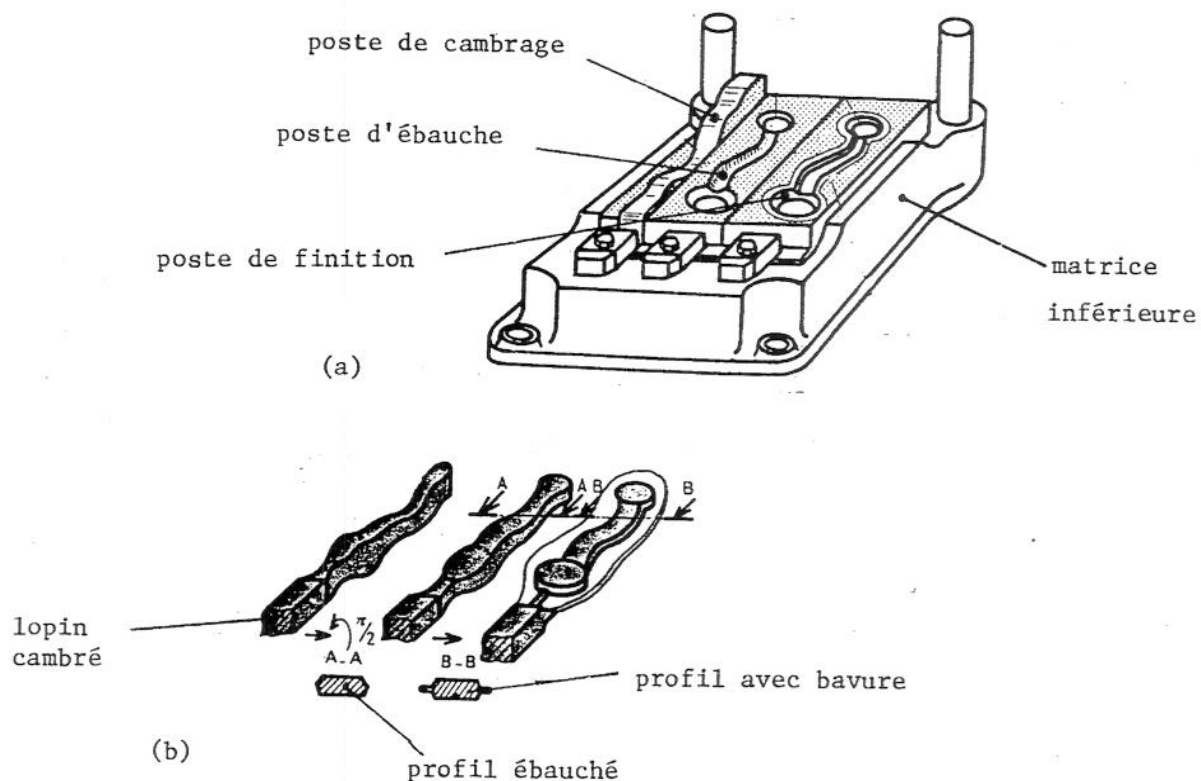


Figure 6.9: L'estampage en trois étapes: cambrage, ébauche, finition  
(a) La matrice inférieure - (b) La pièce après chaque étape.

Les étapes successives de forgeage présentent les avantages:

- de mieux répartir le métal, surtout si la pièce est courbe
- d'éviter les repliures et les criques
- d'éviter une usure prématurée des matrices
- de créer une meilleure répartition des fibres.

### Les principes d'estampage

La figure 6.10.a montre une tête de bielle de moteur obtenue par des estampages successifs. L'alésage brut possèdera une paroi centrale d'épaisseur  $e$  car le métal ne peut être totalement évacué lors de l'estampage.

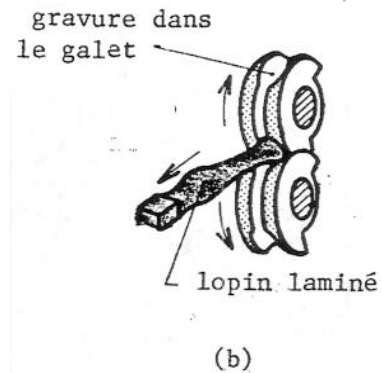
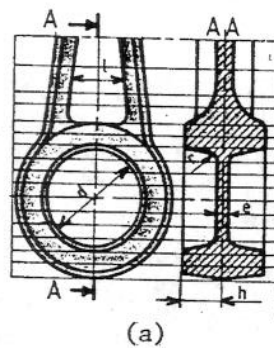


Figure 6.10: Produits d'estampage (a) bielle de moteur  
(b) l'estampage par roulage

La figure 6.10.b montre un autre principe d'estampage où les matrices sont des galets de laminoir avec gravure circonférencielle du profil de la pièce. Les rails de chemin de fer sont ainsi obtenus. Ce principe écarte les effets négatifs du choc.

### L'estampage et la recristallisation des grains

L'acier recuit, c'est-à-dire refroidi lentement (à l'air ambiant), a la structure microscopique de la figure 6.11.a où les grains de taille uniforme n'ont pas de direction d'orientation préférentielle. Le matériau est dit "isotrope"; ses propriétés mécaniques (élastique ou à la rupture) sont identiques dans toutes les directions.

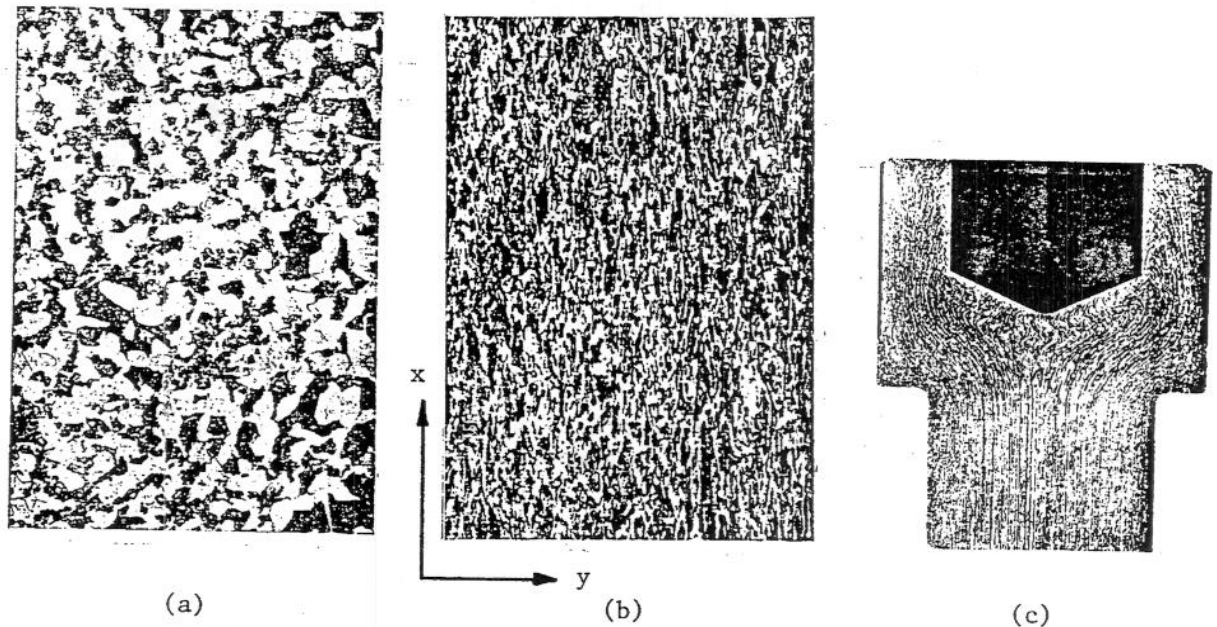


Figure 6.11: Vues microscopiques d'un (a) acier recuit, (b) acier forgé, (c) Tête de boulon forgée à froid.

Si l'acier est forgé en dessous de sa température de recristallisation  $\theta_c$  (à froid), les grains demeurent allongés dans une direction préférentielle semblable à ceux de la figure 6.11.b. Le matériau est dit alors "anisotrope"; ses propriétés mécaniques sont accrues dans le sens du grain  $x$  et diminuées dans le sens  $y$ . Si la charge appliquée à la pièce est orientée suivant  $x$ , le matériau forgé sera plus résistant que le matériau recuit. Par contre, le matériau est affaibli suivant la direction  $y$ . Si l'acier est maintenant forgé au-dessus de sa température de recristallisation  $\theta_c$  (à chaud) et se refroidit lentement, les grains déformés par forgeage retrouvent leur forme initiale de la figure 6.11.a.

En estampage, la notion de chaud et froid n'est plus par rapport à la température ambiante mais par rapport à la température de recristallisation  $\theta_c$  qui est aux environs de  $760^{\circ}\text{C}$  pour l'acier. Une pièce estampée à  $400^{\circ}\text{C}$  (à froid) demandera toutefois de plus faibles forces de forgeage qu'à la température ambiante.

La température d'estampage est un paramètre important où :

- à froid (écrouissage), la résistance augmente dans une direction;
- à chaud (corroyage), la résistance demeure inchangée.

Par exemple, le boulon de la figure 6.11.c a ses grains déformés orientés parallèlement à l'axe du boulon comme la charge de traction que devra reprendre ce boulon.

Remarque: L'estampage du plomb à la température ambiante est un estampage à chaud car sa température de recristallisation est en dessous de  $20^{\circ}\text{C}$ .

6.3.b) L'estampage - refoulement ou forgeage  
coulisseau supportant les poinçons  
1, 2 et 3.

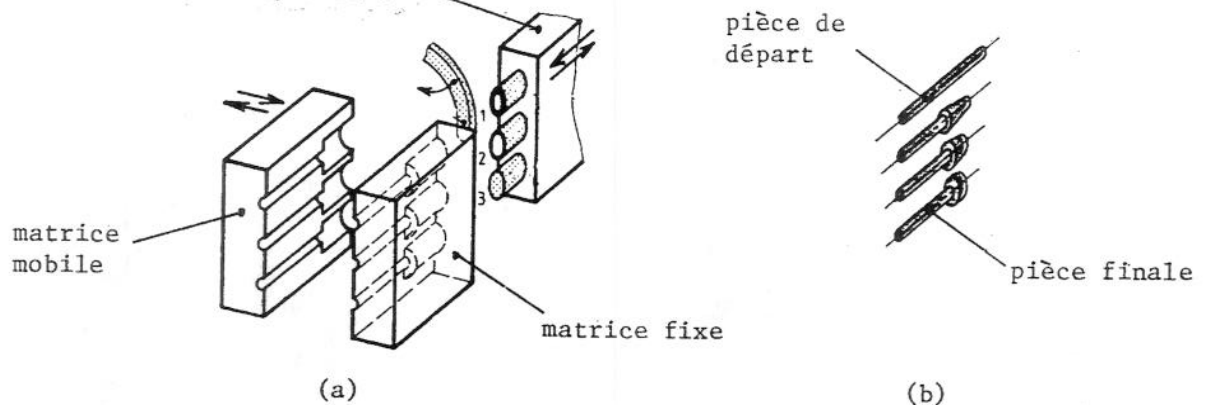


Figure 6.12: Principe de l'estampage par refoulement  
(a) les matrices et les poinçons  
(b) les déformations successives de la pièce

A la figure 6.12, une barre cylindrique de forme simple est pincée fortement entre deux matrices afin d'y être solidement retenue. Le poinçon 1 vient diminuer la longueur

de la barre en créant une expansion de son diamètre. La barre déformée est ensuite déplacée dans une autre cavité des matrices pour recevoir l'impact du poinçon 2. Le poinçon 3 donne la forme finale.

Ce forgeage se fait à volume constant, aucune bavure n'est créée.

Les procédés de forgeage présentés ci-dessus s'appliquent à partir de moyennes séries de pièces à cause du coût de fabrication des matrices. La rugosité et les tolérances obtenues sont:

$$IT \text{ moyen} = 1 + \frac{d}{100} \text{ (mm.) et } Ra \approx 12.5 \mu m$$

Remarque importante: Les pièces estampées devant être usinées sont prévues avec une surépaisseur de 2 à 3 millimètres sur chaque surface à usiner.

### 6.3.c) Le filage

Sous un effort de compression souvent par choc, entre un poinçon et une matrice, le métal s'écoule en produisant une pièce de forme définie par celle de l'outillage (poinçon et filière). Le filage se fait généralement à chaud. La figure 6.13 montre différents principes de filage.

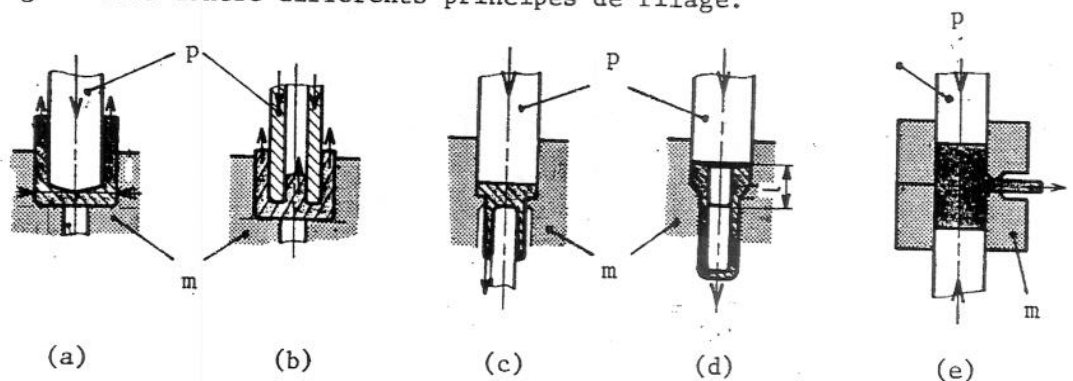


Figure 6.13: Quelques principes de filage. (p = poinçon, m = matrice)  
 (a) Le métal s'écoule le long et autour du poinçon.  
 (b) Le métal s'écoule aussi à l'intérieur du poinçon.  
 (c) La pièce finale est tubulaire par écoulement du métal autour d'une butée cylindrique fixe.  
 (d) La forme du poinçon peut aussi créer une pièce tubulaire.  
 (e) Filage latéral; le métal s'écoule latéralement.



Les profilés d'aluminium sont obtenus par filage. Dans un procédé semblable à celui de la figure 6.13.e, le métal s'écoule à travers une filière ("die") qui lui impose un profil.

La plupart des pièces tubulaires avec fond sont obtenues par filage par choc tel que le montre la figure 6.14. Une pièce préformée se déforme sous l'impact du poinçon.

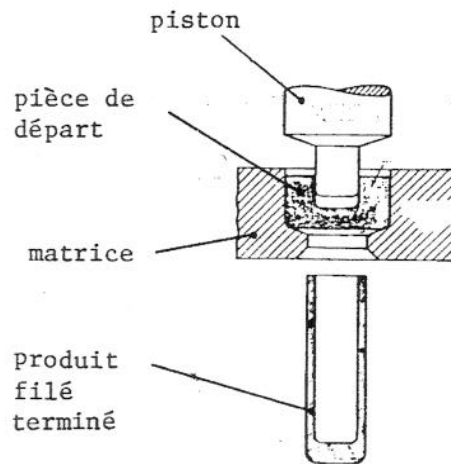


Figure 6.14: Principe du filage par choc.

Les finis de surface et les tolérances obtenues par filage sont excellents:

$$IT = 0.5 + \frac{8d}{1000} \text{ (mm.) et } Ra = 3.2\mu\text{m}$$

#### 6.3.d) L'étirage

L'étirage consiste à tirer une barre à travers une filière afin de réduire son diamètre, figure 6.15. Plusieurs étapes d'étirage successifs permettent d'obtenir des fils de très petit diamètre. L'opération se fait généralement à froid.

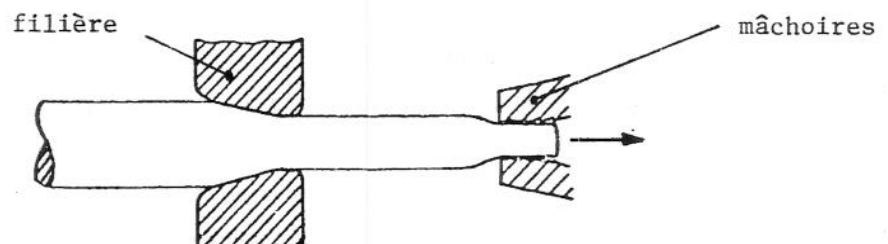


Figure 6.15: Principe de l'étirage. Une tige de métal est tirée à froid à travers une filière conique.

Les intervalles de tolérance et les états de surface des pièces filées sont remarquables:

$$IT = h10 \text{ à } h9 \quad \text{et} \quad Ra = 3.2 \text{ à } 1.6\mu\text{m}$$

#### 6.4 Le frittage ou métallurgie des poudres

Des poudres métalliques et/ou de réfractaires de diamètres  $\approx 100 \mu\text{m}$  sont moulées par pressage et frittage. La figure 6.16 montre les deux étapes du processus.

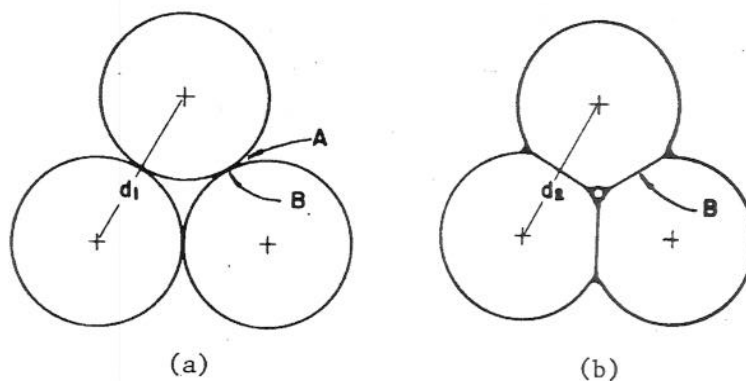


Figure 6.16: La métallurgie des poudres: (a) le pressage, (b) le frittage

Figure 6.16.a) Le pressage. Les particules sont comprimées par un piston afin de se placer entre elles. Peu de déformation se produit à leurs contacts.

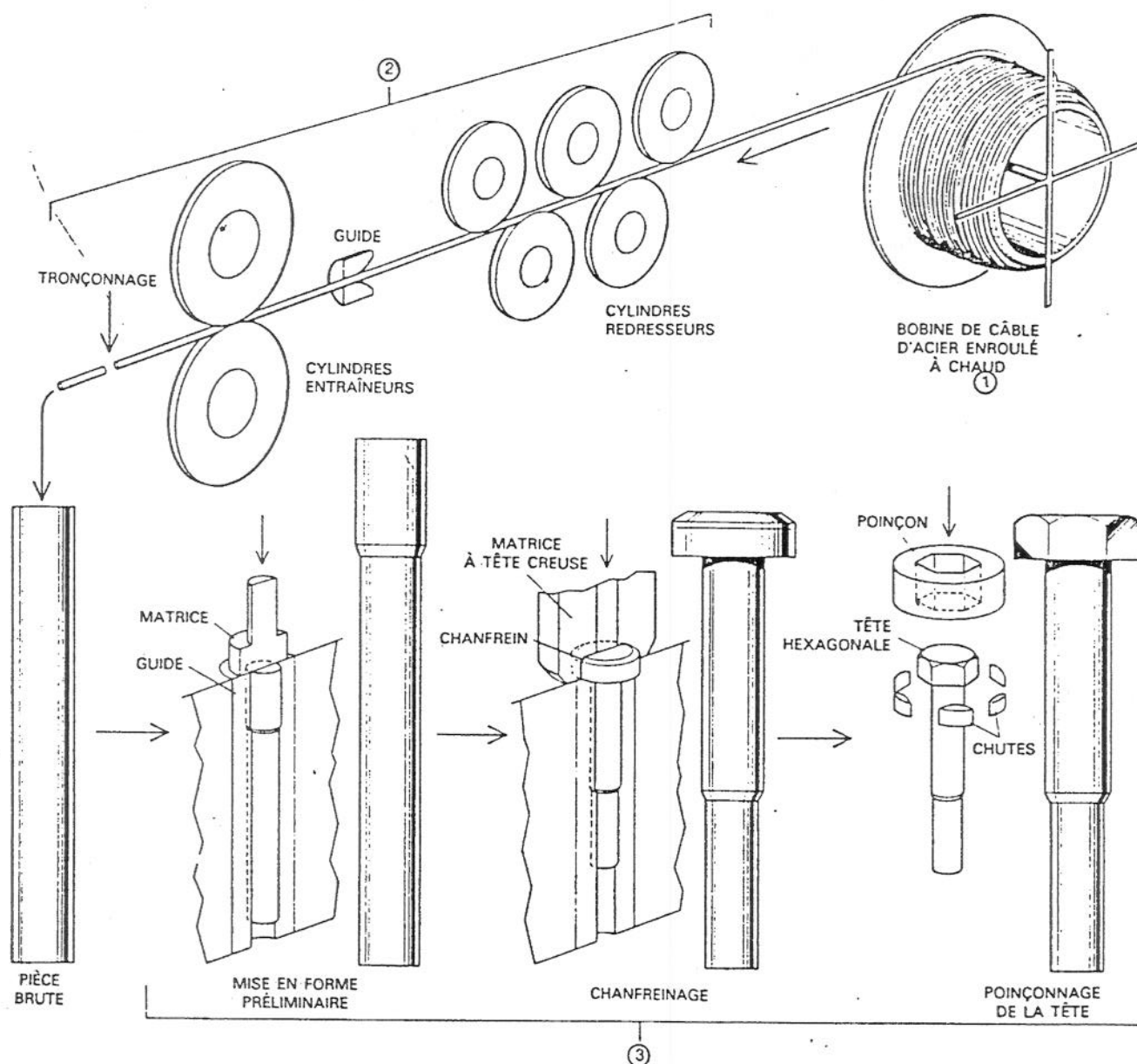
Figure 6.16.b) Le frittage. Les particules assemblées sont chauffées. Par diffusion, les aires de contact entre particules sont augmentées. Il peut même se produire soudage. Les propriétés mécaniques de l'ensemble sont obtenues durant cette étape.

Les pièces frittées sont des pièces de géométrie simple qui ne demandent aucun usinage de surface; les caractéristiques dimensionnelles sont généralement de qualité. Les pièces frittées finies demeurent malgré tout poreuses et leurs propriétés mécaniques sont inférieures à celles du même matériau qui serait homogène. Cette porosité présente toutefois l'avantage d'emmagasinier le lubrifiant (huile) dans le cas de coussinets pour paliers.

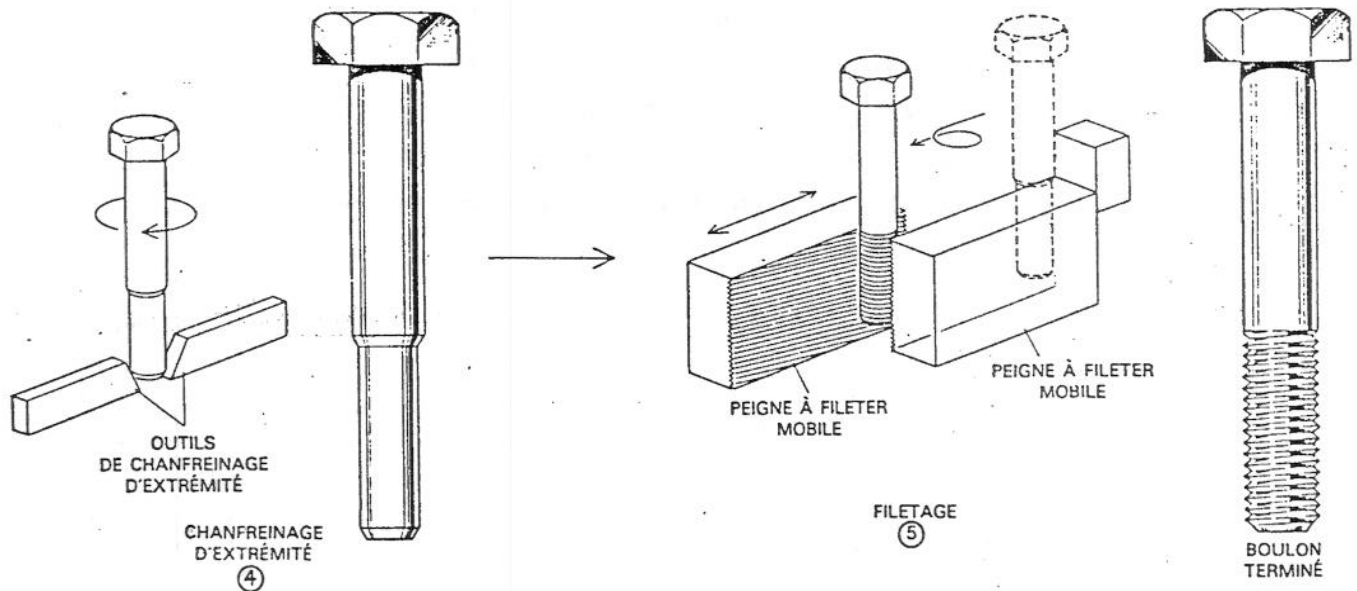
## 6.5 Autres exemples d'obtention de pièces

### 6.5.1 Production d'un boulon standard

Pour fabriquer un boulon à froid, on part d'une bobine de fil métallique (1). Ce fil se déroule, passe entre des redresseurs et ensuite dans une filière qui le réduit au diamètre désiré; le fil est alors débité en tronçons de longueur égale (2). Ces tronçons passent dans une machine à trois étapes d'étampage. La première étape ébauche la forme, la seconde crée la tête chauffreïnée du boulon alors que la troisième taille l'hexagone par poinçonnage (3).

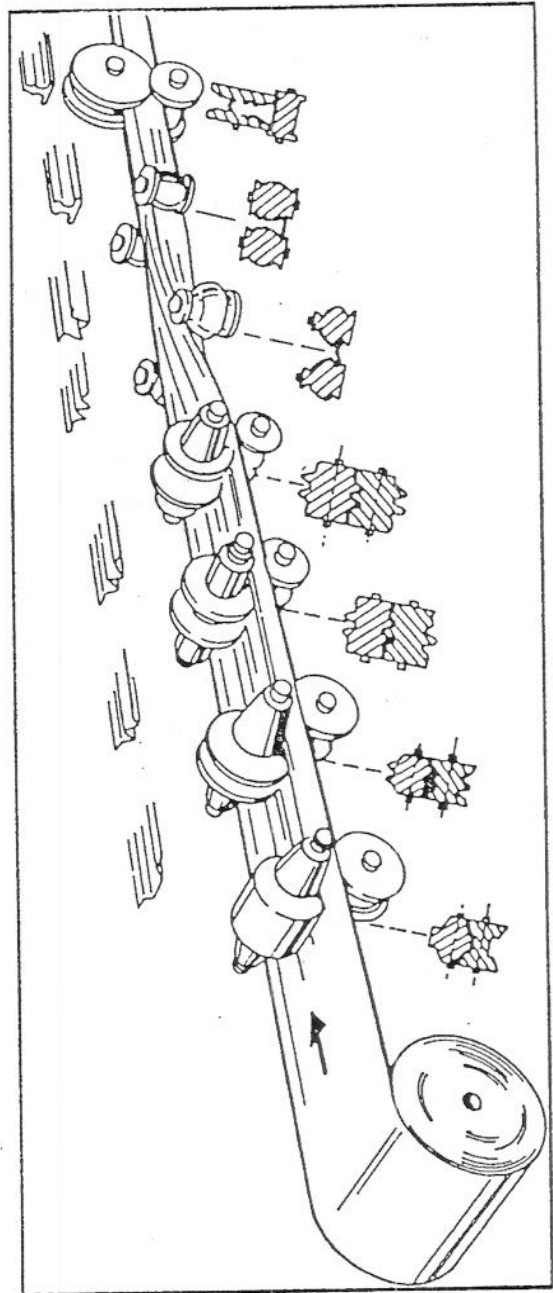
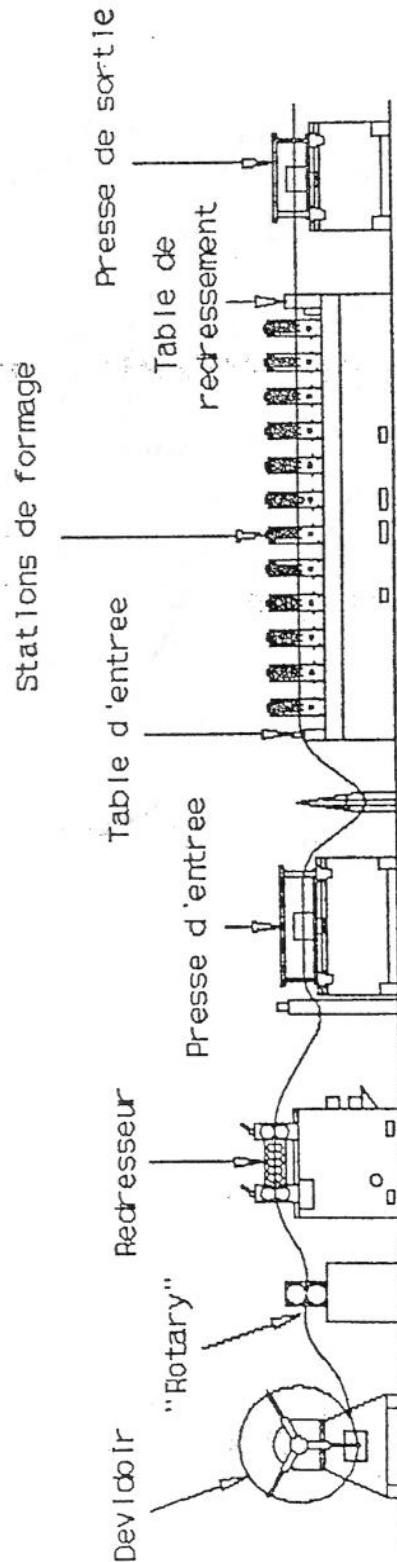


Un chanfrein est usiné à l'extrémité (4) ensuite le boulon est pris entre deux peignes (l'un fixe et l'autre mobile) pour écrouir la forme de filetage (5).

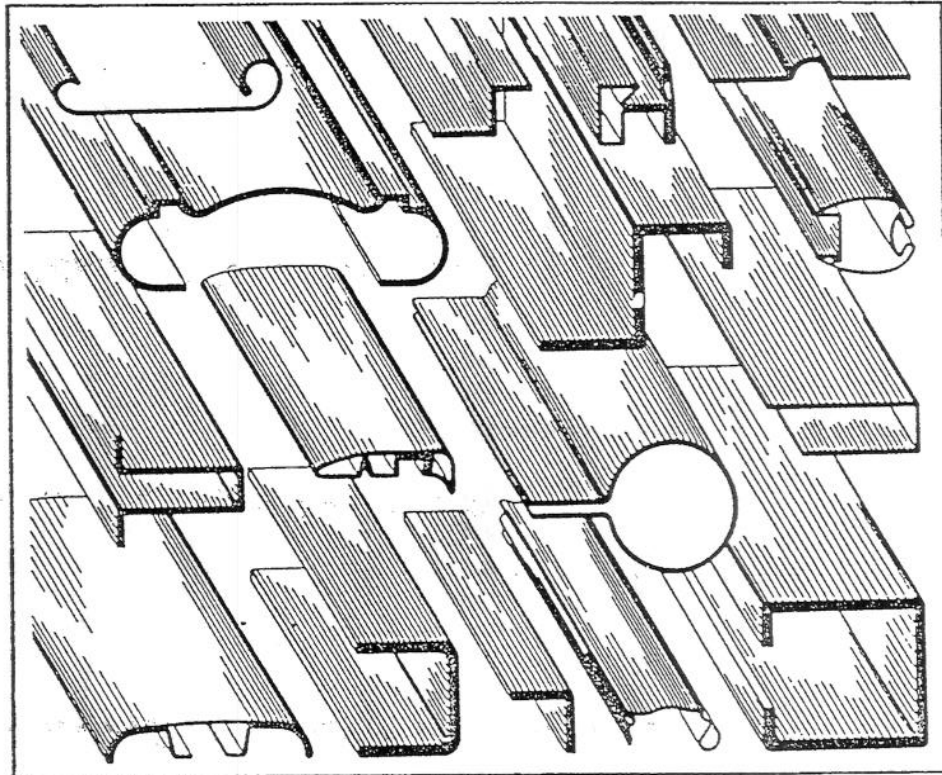


### 6.5.2 Formage du métal en feuille (roll forming)

Les figures ci-dessous montrent les postes de travail d'une machine de formage d'un rouleau de métal en feuille. A chaque poste, une opération de poinçonnage ou de formage graduel est apporté à la feuille.



La figure ci-dessous montre des exemples de profils obtenus par formage. Les nouveaux "2 x 4" métalliques, très fréquents dans la construction immobilière, sont obtenus à partir de ce procédé.



## CHAPITRE VII

### LES PROCEDES D'USINAGE

#### 7.1 Introduction

Les procédés d'usinage désignent les procédés de travail des métaux par enlèvement de matière. Que cet enlèvement se fasse par la formation d'un copeau de coupe, ou par microcopeaux, ou par électroérosion, dans tous les cas il s'agit d'une opération d'usinage.

Aux U.S.A., les dépenses relatives aux travaux d'usinage s'élèvent à environ 5% du produit national brut. Le domaine de l'usinage qui a toujours été à la base des fabrications mécaniques est un domaine en constants mouvements à cause:

- de la mise au point de nouveaux alliages qui pose des problèmes d'usinage.
- d'une constante recherche d'une meilleure productivité: réduction des temps d'usinage ainsi que des temps morts.
- de l'application de nouvelles technologies: commande numérique,...
- de l'application de nouveaux matériaux de coupe.

Ce chapitre présente une revue des procédés d'usinage couramment utilisés. Il a pour but de faire connaître les possibilités de chaque procédé d'usinage afin de pouvoir les choisir lors de la rédaction d'une gamme d'usinage traitée au chapitre # 10. Les procédés d'usinage se présentent comme suit:

USINAGE  
par  
enlèvement de matière

DECOUPAGE: Poinçonnage

COUPE OU TAILLAGE: Travail d'outils tranchants par perçage, rabotage, tournage, fraisage.

TRAVAIL PAR ABRASION: Meulage, rectification, rodage, polissage

PROCEDES PHYSICO-CHIMIQUES: L'enlèvement de matière à l'aide d'une action non-mécanique: électroérosion, usinage chimique...

## 7.2 Le découpage

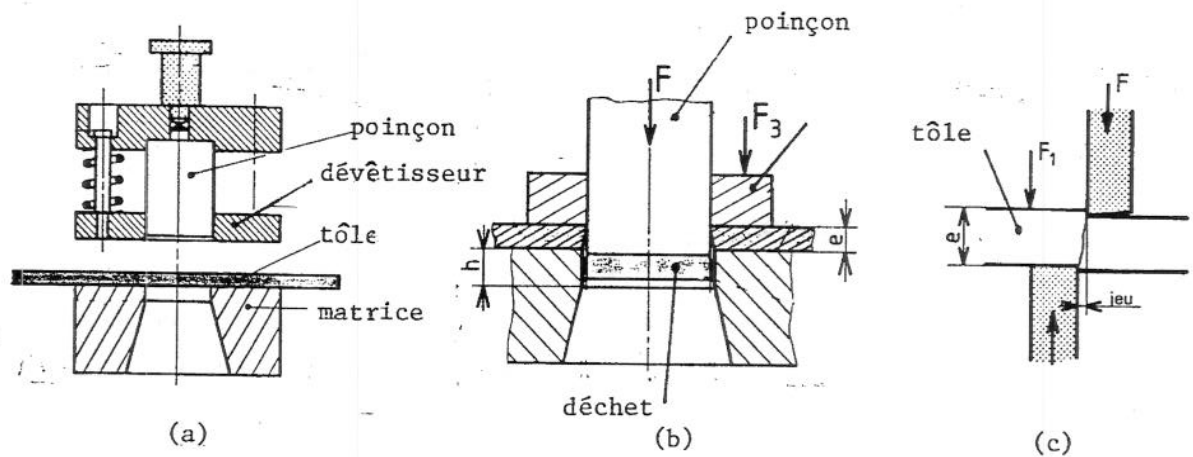


Figure 7.1: Principe du découpage

Les figures 7.1.a et b décrivent le principe du découpage d'une tôle de métal laminé à froid qui se présente sous forme de bande de largeur constante ou sous forme de bobine. La tôle repose sur la matrice. Le découpage se produit lorsque l'ensemble du poinçon descend; le dévêtisseur s'appuie sur la tôle pendant que le poinçon vient cisailer la tôle comme des lames de cisaille. Le rôle du dévêtisseur est d'éviter tout soulèvement de la tôle. Le coulisseau remonte et la tôle peut être déplacée pour une autre découpe.

La figure 7.1.c montre une section de cisaille où un jeu doit exister entre la matrice et le poinçon. Ce jeu doit être égal à 0.03 et 0.05 fois l'épaisseur de la tôle pour l'acier doux et l'aluminium respectivement.

La figure 7.2 schématise les différentes opérations courantes de découpage.



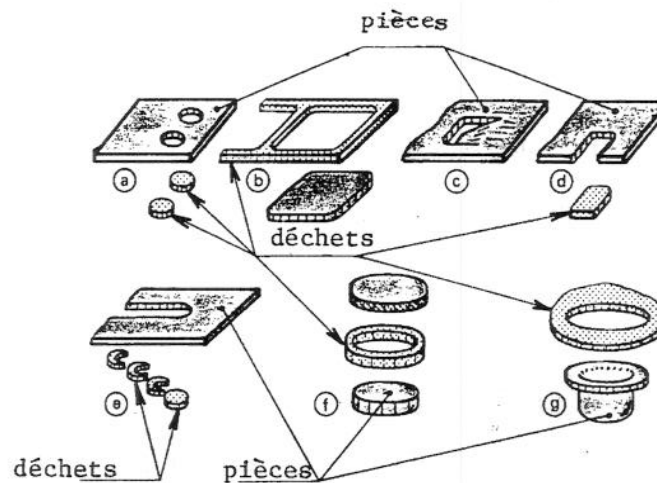


Figure 7.2: Les opérations de découpage

- (a) Poinçonnage. Les déchets sont séparés de la pièce
- (b) Découpage. Les déchets peuvent être récupérés pour un autre usage.
- (c) Crevage. Le découpage est partiel.
- (d) Encochage. Un seul déchet pris à partir du bord
- (e) Grignotage. La forme finale est obtenue par de successifs poinçonnages.
- (f) Arasage. La pièce subit deux découpages; la cote finale est plus précise.
- (g) Détourage - Découpage et déformation plastique de la pièce

Les métaux à découper ne doivent pas être durs et cassants, mais posséder une très bonne déformabilité à froid. Les pièces provenant de découpage sont rarement usinées, elles sont plutôt assemblées par rivetage ou soudage (exemple: soudage par point, "spot welding").

Le découpage est un procédé d'usinage très intéressant lorsqu'un nombre de pièces d'épaisseur constante sont à produire (exemple: rondelles). Des découpeuses à commande numérique contrôlent le déplacement de la tôle sur la table ainsi que le changement du poinçon.

### 7.3 L'usinage par coupe

L'usinage par coupe consiste à enlever le métal sous forme de copeaux que taille l'outil de coupe sur la pièce. L'outil de coupe et la pièce à usiner sont installés sur la machine-outil. Il existe quatre grandes opérations de coupe soit:

- le perçage et l'alésage
- le tournage
- le fraisage
- le rabotage et le brochage

Avant de présenter chacune de ces opérations de coupe, il est utile de définir quelques notions de base au sujet du principe de coupe.

### 7.3.a) Le principe de coupe

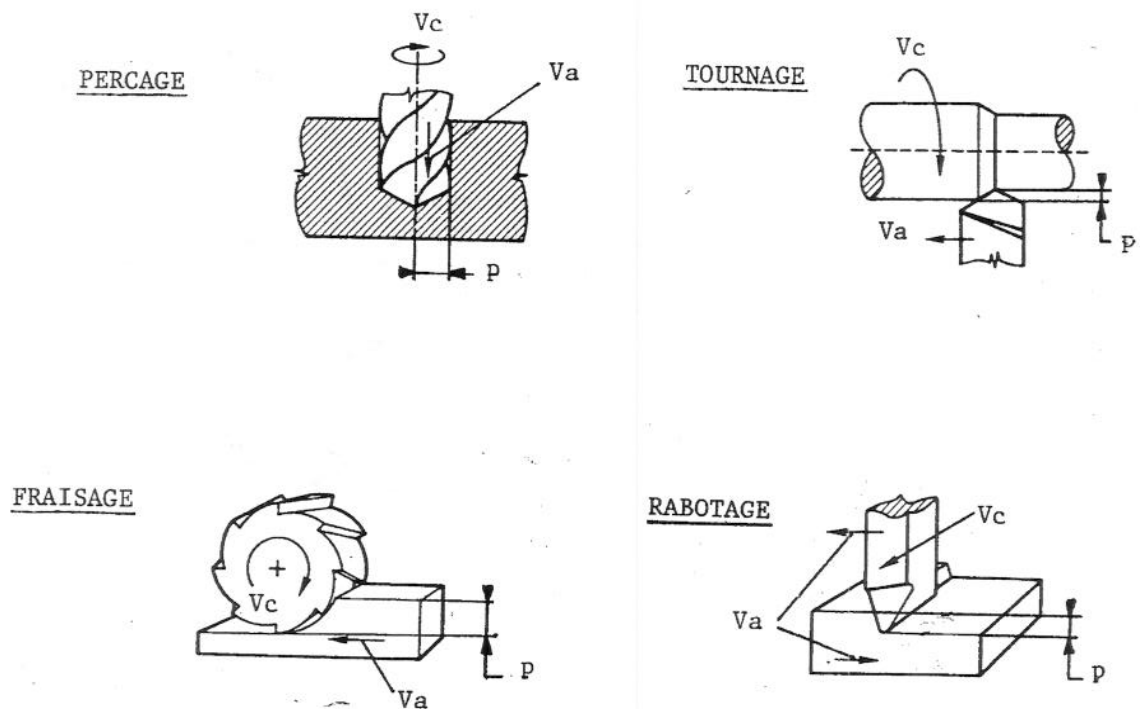
La théorie de coupe a fait l'objet de nombreuses recherches, les ouvrages sur le sujet sont très précis. Alors qu'à lui seul ce sujet pourrait faire l'objet de plusieurs séances de cours, le présent paragraphe présente seulement les notions de base de la coupe, notions utiles pour le choix des outils.

#### Les paramètres de coupe

Quel que soit le procédé d'usinage, la réalisation d'une surface résulte de la combinaison de deux mouvements et d'une dimension:

- un mouvement rapide précisé par la vitesse de coupe,  $V_c$ , c'est la vitesse à laquelle l'outil entre dans la pièce ou vice versa.
- un mouvement lent précisé par la vitesse d'avance,  $V_a$ , c'est cette vitesse qui donne l'épaisseur du copeau retiré.
- la profondeur de passe appelée plus simplement passe,  $p$ , est l'épaisseur de la couche de matériau retiré de la pièce.

La figure 7.3 montre les mouvements de coupe et d'avance et la passe pour chacune des quatre opérations de coupe.



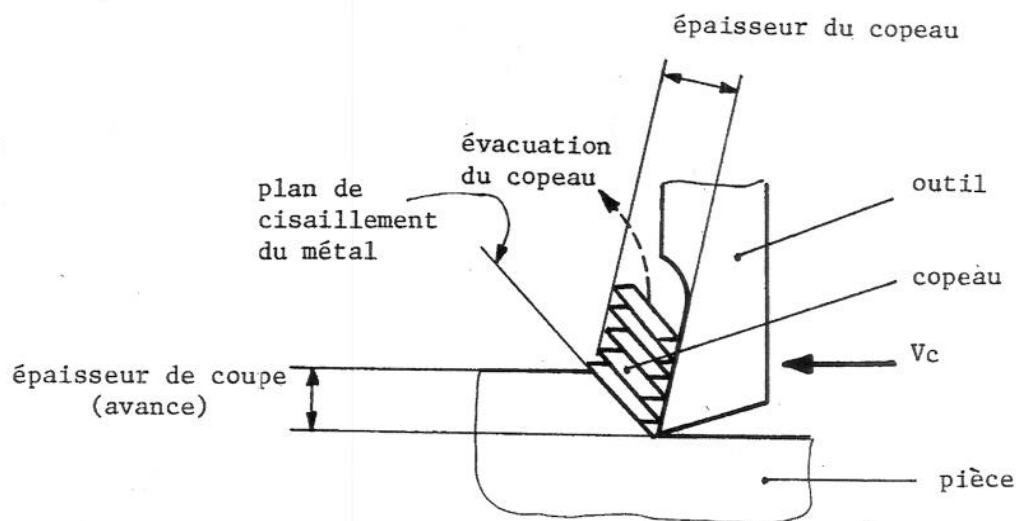
**Figure 7.3:** Mouvements de coupe ( $V_c$ ) et d'avance ( $V_a$ ) et passe ( $p$ ) dans les quatre opérations de coupe. L'opération de rabotage peut être aussi bien un déplacement de l'outil sur la pièce fixe que la pièce sur l'outil fixe.

Dans les quatre cas de la figure 7.3, la profondeur de passe,  $p$ , est représentée. Elle se définit comme suit:

- en perçage  $p$  = rayon du forêt ou agrandissement du rayon si un avant-trou est déjà percé.
- en tournage  $p$  = variation du rayon de la pièce.
- en fraisage  $p$  = épaisseur de la couche de matière retirée de la pièce.
- en rabotage  $p$  = épaisseur de la couche de matière retirée de la pièce.

#### Formation du copeau

Les vitesses de coupe et d'avance sont d'importants paramètres de coupe, elles dépendent principalement des matériaux de la pièce et de l'outil de coupe. Les outils de coupe, quelle que soit leur forme, créent une compression sur le métal qui se rupture en cisaillement pour former un copeau qui glisse sur la face de coupe de l'outil. D'après une vue orthogonale pure, la figure 7.4 schématise la formation du copeau comme l'empilement de cartes.



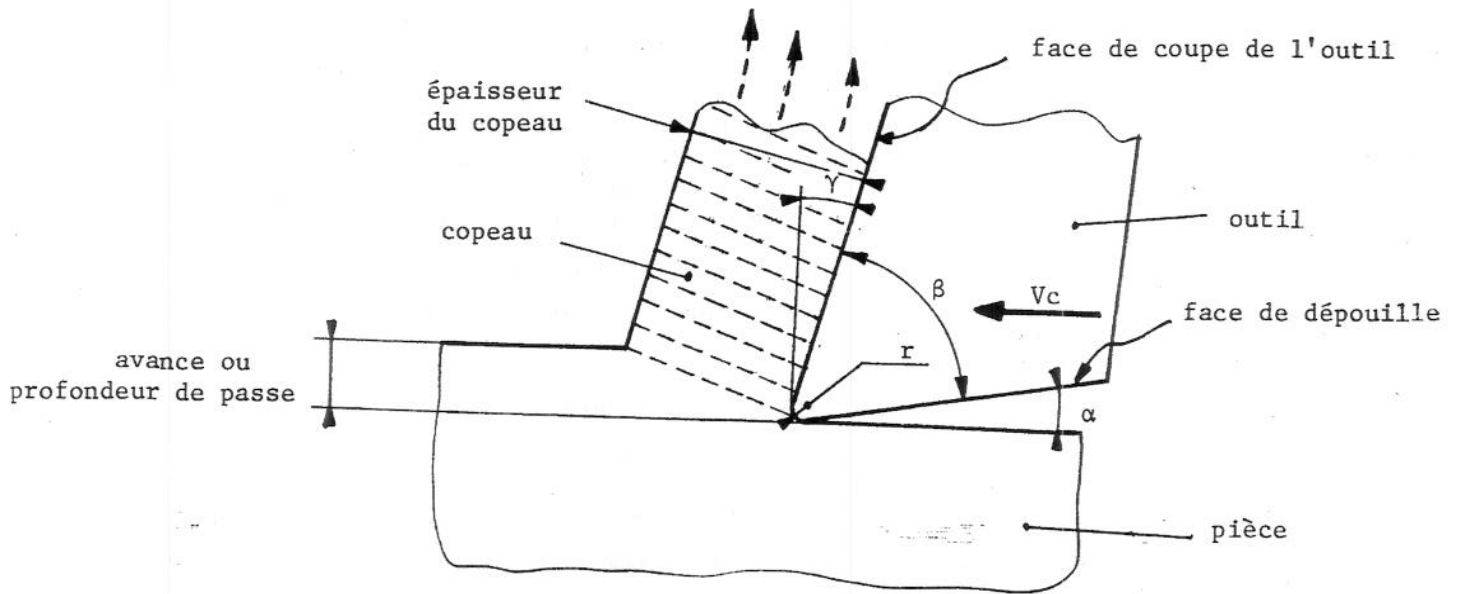
**Figure 7.4:** Formation d'un copeau. L'outil vient comprimer la matière qui se cisaille pour former le copeau qui monte sur l'outil.

Le copeau peut se dégager sous forme discontinue ou fragmentée. Dans ce cas, le cisaillement est total et la continuité se brise en passant au plan de cisaillement. Ce genre de copeau se produit lors d'usinages de matériaux fragiles comme la fonte.

Le copeau peut aussi se dégager sous forme continue, le cisaillement est incomplet et les fragments restent toujours solidaires. La plupart des aciers produisent ce genre de copeau.

#### L'outil de coupe

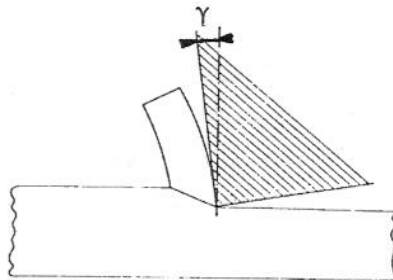
Sur la vue orthogonale de coupe de la figure 7.5 sont tracés les angles d'affûtage d'un outil de coupe.



**Figure 7.5:** Modèle simplifié des angles d'affûtage d'un outil de coupe.

$\gamma$ , angle de coupe  
 $\alpha$ , angle de dépouille  
 $\beta$ , angle de tranchant  
 $r$ , arrondi d'arête

L'angle de coupe,  $\gamma$ , est l'angle de la surface de coupe avec une perpendiculaire à la surface usinée. Il a un effet direct sur les efforts de coupe. Il peut être positif (figure 7.5) ou négatif (figure 7.6).



**Figure 7.6:** Angle de coupe  $\gamma$  négatif

Bien que l'angle de coupe,  $\gamma$ , négatif augmente les efforts de coupe, il présente les avantages suivants:

- améliorer la résistance de l'arête de coupe grâce à l'augmentation de l'angle tranchant,  $\beta$ .
- accroître la contrainte de cisaillement à la formation du copeau et de ce fait favoriser la formation du copeau discontinu. Cette assurance est notamment intéressante en fraisage avec des outils fragiles tels que les carbures métalliques et les céramiques.
- améliorer l'état de surface obtenu.
- favoriser l'usinage des matériaux durs.

L'angle de dépouille,  $\alpha$ , assure que l'arrière de l'outil ne talonne pas sur la surface usinée.

L'arrondi d'arête,  $r$ , doit être réalisé à l'affûtage car une arête vive ne restera jamais vive en usinage. L'arrondi d'arête fait que l'outil refuse de couper le métal lorsque l'épaisseur de la matière est inférieure à une certaine valeur appelée le copeau minimum.

Le copeau minimum : A cause de l'arrondi d'arête,  $r$ , un outil de coupe ne peut pas enlever de matière si l'épaisseur à retirer est inférieure à une certaine valeur. Alors l'outil écrouit la surface et aucune matière n'est retirée. Les valeurs suggérées de copeau minimum sont les suivantes:

|                 |               |   |                   |
|-----------------|---------------|---|-------------------|
| outil tranchant | ébauche       | — | $\approx 0.5$ mm. |
|                 | demi-finition | — | $\approx 0.3$ mm. |
|                 | finition      | — | $\approx 0.2$ mm. |
|                 | alésage       | — | $\approx 0.1$ mm. |

outil abrasif (meulage, rectification)  $\approx 0.01$  mm.

#### Les matériaux des outils de coupe

Les matériaux des outils de coupe seront discutés dans chacune des opérations de coupe (fraisage, tournage, ...). Cette section présente seulement une revue des matériaux de coupe disponibles sur le marché.

Les aciers au carbone (0.7 à 1.4% de carbone) sont les moins coûteux. Un accroissement du taux de carbone augmente la dureté mais rend l'outil fragile. Ces aciers qui ne tolèrent pas de température supérieures à 280°C travaillent à de faibles vitesses de coupe et sont employés pour l'usinage des matériaux "mous" et non ferreux.

Les aciers rapides - Le mot "rapide" signifie à grande vitesse de coupe par rapport aux aciers au carbone. Ce sont des aciers au carbone contenant du tungstène (1 à 20%), du molybdène ( $\approx 4\%$ ), du chrome ( $\approx 4\%$ ), et du vanadium ( $\approx 2\%$ ). Ils conservent leur dureté à chaud (700°C), cette dernière peut être accrue par l'addition de cobalt. Un lubrifiant est malgré tout conseillé.

Les carbures cémentés sont obtenus par frittage pour être commercialisés sous forme de plaquettes (figure 7.7.a), montables sur des portes-outils de tournage (figure 7.7.b) et de fraisage (figure 7.7.c). Les carbures contiennent des poudres de carbure de tungstène de

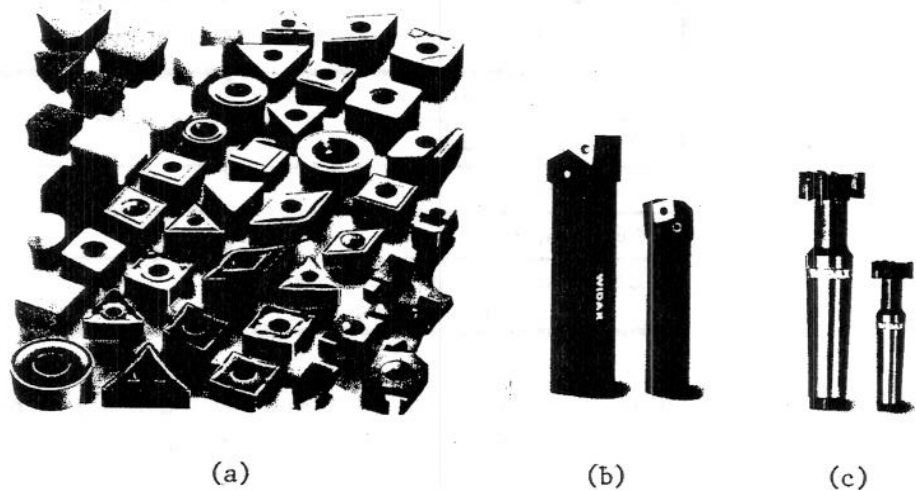


Figure 7.7.(a) Différentes formes de plaquettes d'usinage installées sur un porte-outil de tournage (b) et de fraisage (c).

titanium et de cobalt. Les carbures travaillent sans lubrifiant car leurs propriétés mécaniques ne sont pas affectées jusqu'à  $1100^{\circ}\text{C}$  ( $1850^{\circ}\text{F}$ ). Un grand inconvénient des carbures est d'être fragile aux chocs (très peu résilient).

Les plaquettes présentent l'avantage de posséder plusieurs arêtes de coupe. Lorsqu'une des arêtes de la plaquette est usée ou effritée, la même plaquette est tournée ou retournée pour utiliser une nouvelle arête intacte.

Les céramiques se présentent également sous forme de plaquettes. Leurs résistances mécaniques et à l'usure sont excellentes à haute température ( $1250^{\circ}\text{C}$ ,  $2200^{\circ}\text{F}$ ). Tout comme les carbures, les céramiques sont peu résilientes. La vitesse de coupe est très élevée.

Les diamants, très rarement utilisés en production, donnent d'excellents états de surface.

Le tableau 7.1 ci-dessous donne des valeurs comparatives de vitesses de coupe pour chacun de ces différents matériaux d'outils de coupe. Ces valeurs ont une signification quantitative car la vitesse de coupe dépend également du matériau à usiner.

| Matériau d'outil                      | Vitesse de coupe en m/min (pi/min) |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Aciers au carbone                     | 18 (60)                            |
| Aciers rapides                        | 30 (100)                           |
| Carbures                              | 90 (300)                           |
| Céramiques                            | 150 (500)                          |
| Céramiques avec revêtement de surface | 210 (700)                          |

Table 7.1 - Vitesse de coupe,  $V_c$ , des différents matériaux d'outils de coupe. Dans tous les cas, les valeurs données dans le tableau correspondent à l'usinage d'un acier mi-dur.



### 7.3.b) Le perçage et l'alésage

#### Le principe du perçage

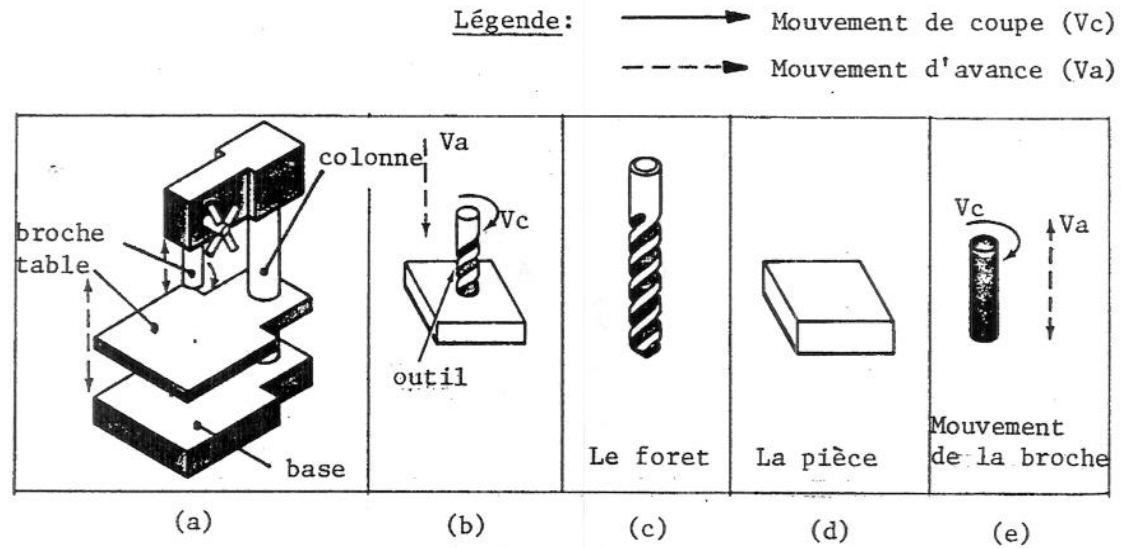


Figure 7.8: Principe du perçage

- a) La machine: Le mouvement d'avance ( $V_a$ ) peut être donné à la broche ou à la table.
- b) Le procédé: L'outil de coupe (le foret) entre dans la pièce en tournant.
- c) L'outil: Le foret, outil de coupe à deux lèbres.
- d) Mouvement de la pièce: La pièce est fixe sur la table.
- e) Mouvement de l'outil: La vitesse de coupe ( $V_c$ ) et la vitesse d'avance ( $V_a$ ) sont toutes deux imposées à l'outil.

### Les machines-outils

Basé sur le principe de la figure 7.8.a, il existe plusieurs modèles de perceuses qui répondent à des besoins particuliers. Les perceuses les plus courantes sont présentées ci-dessous.

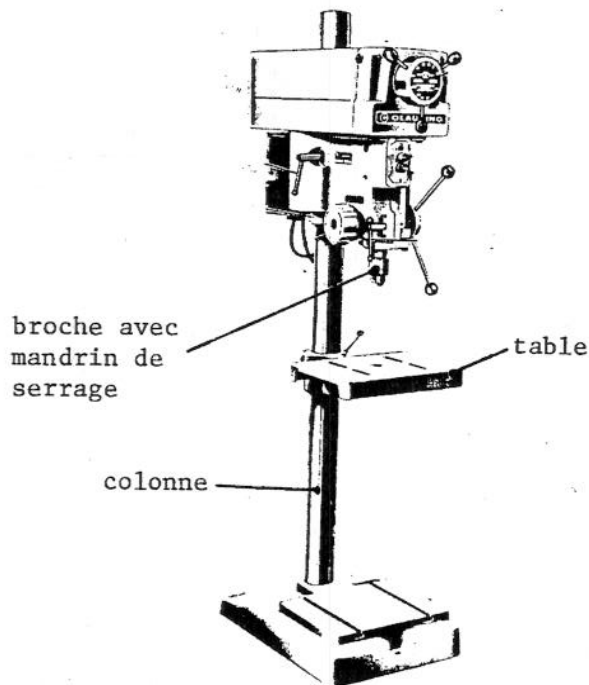


Figure 7.9: La perceuse sensitive

Cette machine-outil est courante dans les petits et moyens ateliers de fabrication. Elle est totalement manuelle et convient pour les petits diamètres (maxi 20 mm). La perceuse sensitive ne possède aucun mouvement d'avance automatique.

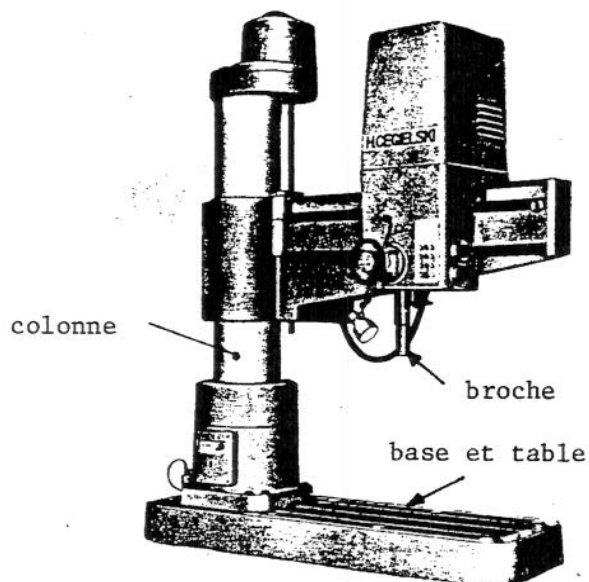


Figure 7.10: La perceuse radiale

Les localisations de l'outil ainsi que ses avances sont automatisées. Cette machine peut recevoir de grosses pièces et percer de grands diamètres.

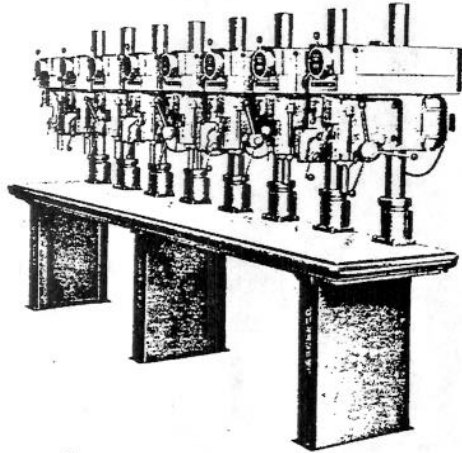


Figure 7.11: Perceuses sensibles en série. Cette disposition devient désuée avec l'avènement des centres d'usinage. Elle permet d'exécuter plusieurs perçages en série sur la même pièce; celle-ci n'ayant qu'à glisser sur la table d'un poste de perçage à un autre.

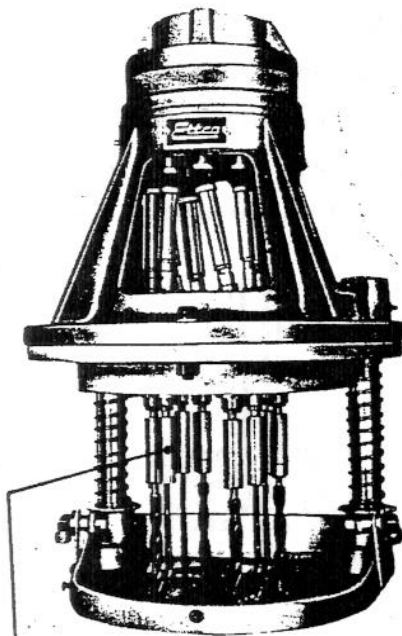


Figure 7.12: La perceuse multi-broches Cette machine-outil, utilisée en production de grande série, permet le travail simultané de plusieurs outils. Chaque axe de broche est préalablement réglé à sa position désirée. La machine est monopolisée durant toute la série de pièces.

huit broches équipées  
d'outils différents

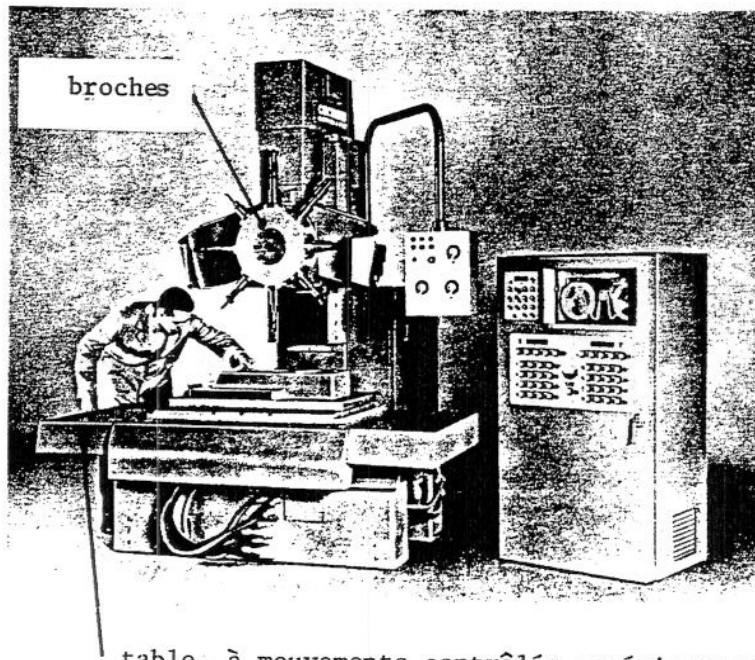


Figure 7.13: La perceuse à commande numérique, CNC.  
La table de la machine peut se déplacer dans le plan et la tête descend. Remarquer la broche tourelle à huit outils, bien sûr les outils travaillent en séquence.

table à mouvements contrôlés numériquement

### Les usinages réalisables

Les outils de perçage, en acier rapide pour la plupart, usinent des diamètres intérieurs. La figure 7.14 montre les six plus communes opérations réalisées en perçage. Les outils vont être présentés individuellement.

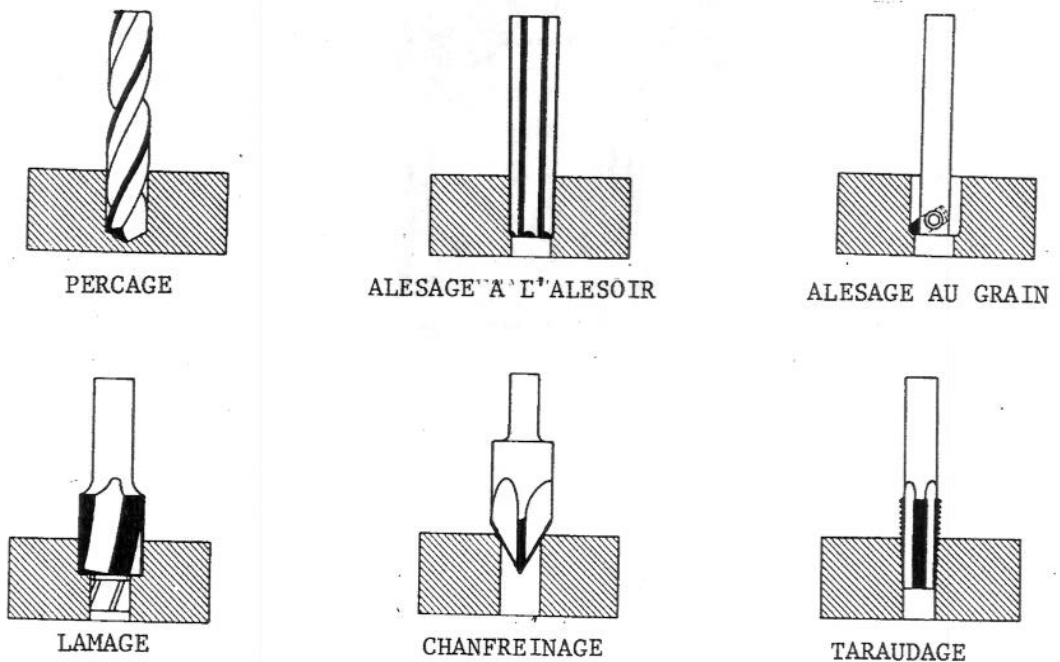


Figure 7.14: Les six plus communes opérations de perçage.

L'opération de perçage avec foret a pour but de retirer beaucoup de matière à la pièce. Au contraire, durant l'opération d'alésage, un mince copeau est enlevé afin de terminer le trou à une cote et à un état de surface rigoureux. L'outil alésoir termine des trous à des cotes usuelles standards, exemple: 20 H8. Si la cote n'est pas usuelle, la barre d'alésage avec grain ajusté termine le trou aux dimensions désirées.

### Les outils

#### Les forêts (drill)

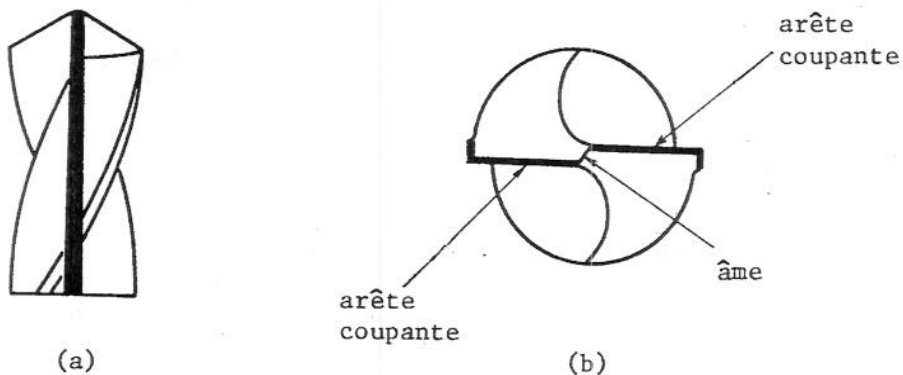


Figure 7.15: Le foret - (a) Vue latérale. La zone sombre est le coeur autour duquel sont creusées les gorges hélicoïdales de dégagement des copeaux.  
(b) Vue de l'extrémité active. L'âme n'est pas une partie coupante.

Le foret hélicoïdal, en acier rapide, possède deux arêtes ou lèvres tranchantes diamétralement opposées. L'extrémité centrale du foret appelée âme (dead center) n'est pas coupante. La longueur de l'âme augmente avec le diamètre du foret. A cause de l'âme, il n'est pas conseillé de percer un trou supérieur à  $\approx 12$  mm sans avoir préalablement percé un avant-trou de diamètre inférieur.

L'âme présente un autre inconvénient. Dans le cas où il n'existe pas d'avant-trou, le foret débute son perçage par l'âme, celle-ci ne peut pas assurer un bon positionnement de

départ car elle écroute le métal; le foret risque donc de dévier de l'axe prévu. Pour remédier à ce problème, un autre outil, le foret à centrer de la figure 7.16, amorce le trou en respectant la localisation de l'axe du trou.

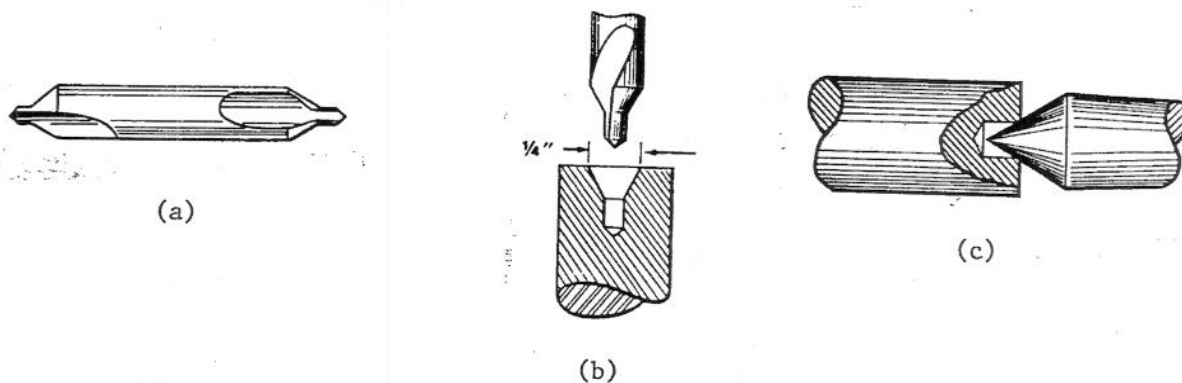


Figure 7.16: (a) le forêt à centrer  
 (b) l'usinage du forêt à centrer  
 (c) la trace du forêt à centrer permet aussi de positionner une pièce sur une pointe conique (tournage entre pointes).

La grande majorité des forets sont de diamètre constant. Il existe toutefois le foret à deux diamètres appelé foret étagé (step drill) tel que montré à la figure 7.17. Ce type de foret qui fait l'objet de commandes spéciales apporte un gain de temps d'usinage.

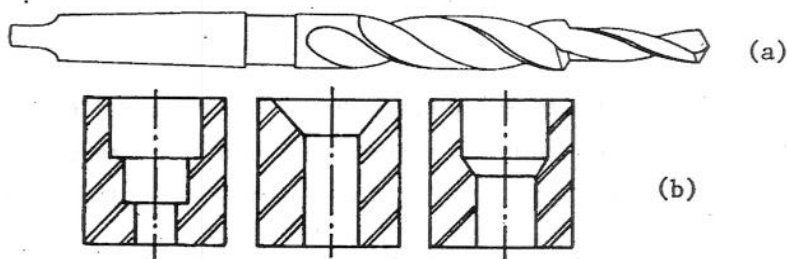


Figure 7.17: (a) le foret étagé  
 (b) usinages intérieurs de forets étagés

### L'alésoir (reamer)

Comme mentionné plus haut, l'alésoir est un outil qui termine des alésages à des cotes et des états de surfaces rigoureux. La passe radiale suggérée pour un alésoir est 0.07 à 0.15 mm, c'est à dire que par exemple, un trou de 20 H8 devra être percé à 19.8 mm avant de recevoir l'alésoir 20 H8.

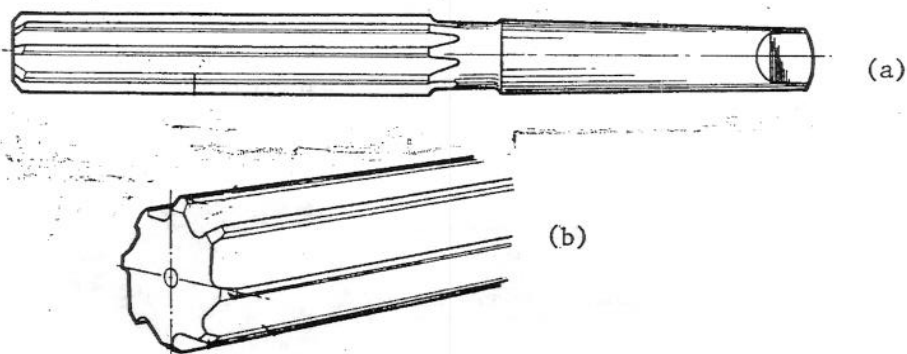


Figure 7.18: (a) L'alésoir - (b) Extrémité de l'alésoir. Les gorges de dégagement des copeaux sont parallèles à l'axe. Il existe également des alésoirs coniques.

Pour des raisons de coûts et de standardisation, il ne peut pas exister un alésoir pour tous les diamètres, les tolérances et les qualités possibles. Les alésoirs couramment distribués correspondent à des cotes nominales usuelles (tous les 1/16 de pouces et tous les 1 à 2 millimètres) avec des qualités 7 ou 8 associées à l'alésage. Hors de ces cas, la barre d'alésage avec grain joue le rôle d'alésoir, voir figure 7.14.

### Le taraud (tap)

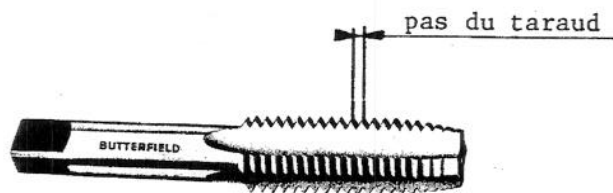


Figure 7.19: Le taraud. Le pas est la distance entre deux filets consécutifs.

Le taraud réalise des filetages intérieurs. Cet outil tourne lentement et l'avance par tour est imposée par le pas, caractéristique même du taraud.

Remarque: Dans le système ISO, un filetage est désigné par son pas, la distance entre deux filets consécutifs. Par contre, le système anglais utilise le nombre de filets au pouce. Il n'y a pas de correspondance entre les filetages standards de ces deux systèmes.

#### L'outil à chanfreiner

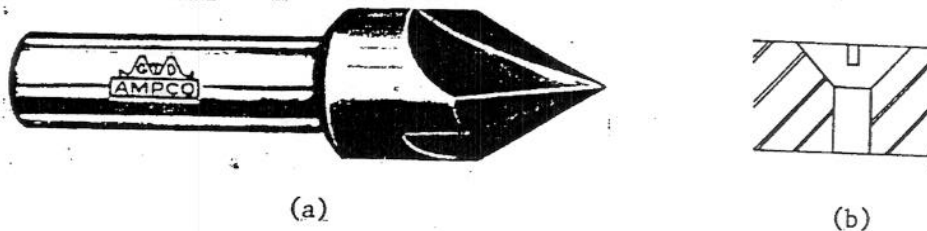


Figure 7.20: (a) L'outil à chanfreiner - (b) Une application: logement de tête de vis conique.

L'outil à chanfreiner a deux principales applications:

- ébavurer les bords d'un trou percé ou alésé
- usiner l'appui conique devant recevoir une tête de vis (figure 7.20.b).

#### L'outil à lamage et à bossage

Un trou percé à travers une pièce peut avoir comme fonction de permettre le passage d'une vis dont la tête doit prendre appui sur la pièce. Trois types d'appui sont possibles:

- le lamage : Surfaçage d'une pièce pour permettre un bon appui à un boulon. La profondeur usinée est faible (figure 7.21.a)
- le chambrage : Usinage d'un logement permettant de dissimuler la tête d'un boulon en offrant toujours un bon appui comme dans le cas du lamage.
- le bossage (figure 7.21.b). A la fonderie de la pièce, une surépaisseur de matière appelée bossage, a été prévue autour du trou. La surface du bossage est à usiner.



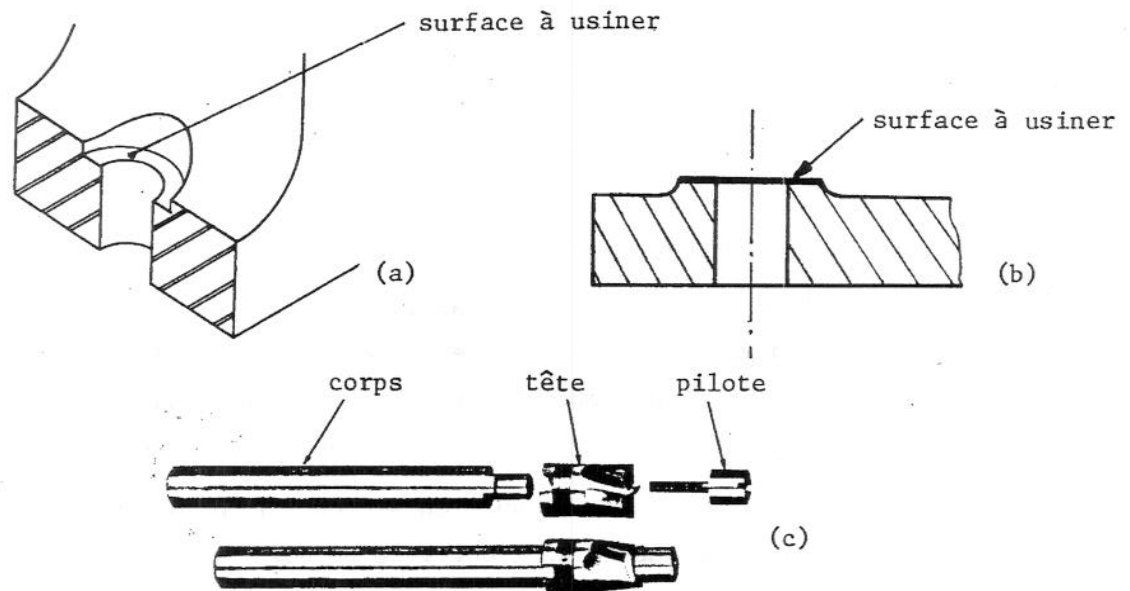


Figure 7.21: (a) le lamage  
(b) le bossage  
(c) l'outil à lamage et à bossage

La figure 7.21.c montre l'outil à dresser ces deux types de surface. Un pilote interchangeable monté à l'avant assure le guidage axial de l'outil pendant que la tête, également interchangeable, usine la surface du lamage ou du bossage.

#### Les paramètres de coupe

##### Vitesse de coupe

La table 7.2 donne les vitesses de coupe moyennes suggérées en perçage pour différents matériaux à usiner. Ces données correspondent à des outils en acier rapide et ne s'appliquent pas aux tarauds. Si l'outil est simplement en acier au carbone, prendre 40% de ces valeurs.

| <u>Matériau à usiner</u> | <u>Vitesse de coupe m/min (pi/min)</u> |
|--------------------------|--|
| Aluminium                | 90 (300)                               |
| Bronze                   | 30 (90)                                |
| Fonte                    | 20 (60)                                |
| Cuivre                   | 25 (80)                                |
| Acier doux               | 45 (150)                               |
| Acier mi-dur             | 30 (100)                               |
| Acier dur                | 20 (60)                                |

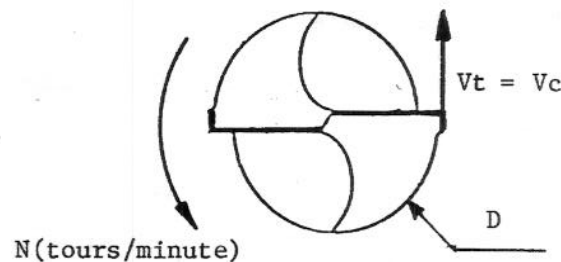
Table 7.2: Vitesses de coupe moyennes suggérées en perçage pour des outils en acier rapide.

### Vitesse de rotation

Pour les outils de perçage, la vitesse de coupe,  $V_c$ , est définie comme la vitesse tangentielle à laquelle le foret vient heurter la matière. A partir de cette information et du diamètre  $D$  de l'outil, la vitesse de rotation  $N$  en tours par minute peut se calculer. Soit:

$V_c$ , la vitesse de coupe en mètres par minute (m/min).

$D$ , le diamètre de l'outil de perçage en millimètres (mm).



$$\text{Vitesse tangentielle, } V_t = V_c = \frac{1}{1000} \cdot \omega \cdot \frac{D}{2} \text{ (m/min)} \quad (1)$$

où  $\omega$  est la vitesse angulaire en radians par minute exprimée:

$$\omega = 2 \pi N \quad (2)$$

Exprimons  $\omega$  à partir des équations (1) et (2)

$$\omega = \frac{2000 V_c}{D} = 2 \pi N$$

$$\text{donc, } \boxed{N = \frac{1000 V_c}{\pi D}} \quad \text{avec } \begin{cases} N, \text{ tr/min} \\ V_c, \text{ m/min} \\ D, \text{ mm} \end{cases} \quad (7.1)$$

Le même développement dans le système anglais donne:

$$\boxed{N = \frac{12 V_c}{\pi D}} \quad \text{avec } \begin{cases} N, \text{ tr/min (RPM)} \\ V_c, \text{ pi/min} \\ D, \text{ po} \end{cases} \quad (7.2)$$

### Avance de coupe

L'avance de coupe en perçage est l'épaisseur de matière que prend le foret à chaque tour, c'est aussi l'avance axiale de l'outil dans la pièce. Il est suggéré de choisir:

0.05 mm/tour pour un diamètre de 4 mm

0.2 mm/tour pour un diamètre de 12 mm

0.3 mm/tour pour un diamètre de 20 mm

0.5 mm/tour pour un diamètre de 30 mm

Pour les taraudages, l'avance par tour est le pas du taraud.

### 7.3.c) Le tournage

Le principe du tournage. Légende: - - - - - ➔ mouvement d'avance ( $V_a$ )  
 ———— ➔ mouvement de coupe ( $V_c$ )

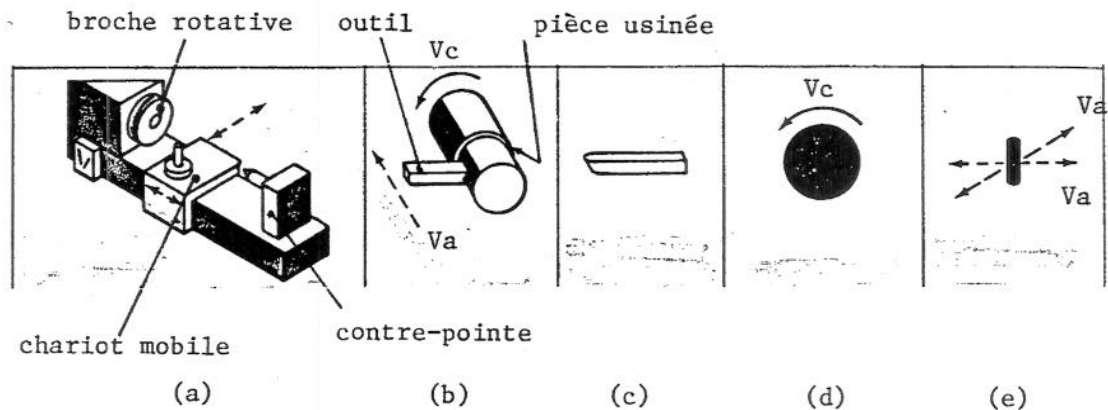


Figure 7.22: Principe du tournage

- (a) La machine - la pièce est installée sur la broche qui tourne en imposant la vitesse de coupe,  $V_c$ . L'outil est monté sur le chariot où deux mouvements d'avance orthogonaux lui sont imposés.
- (b) Le procédé: la pièce tourne et l'outil avance dans la pièce.
- (c) L'outil installé sur le chariot.
- (d) Mouvement de la pièce,  $V_c$  est imposée.
- (e) Mouvements de l'outil suivant deux directions orthogonales.

### Les machines-outils

Tous les tours sont basés sur le principe décrit à la figure 7.22.a à partir duquel de nombreuses options améliorent la performance de la machine.

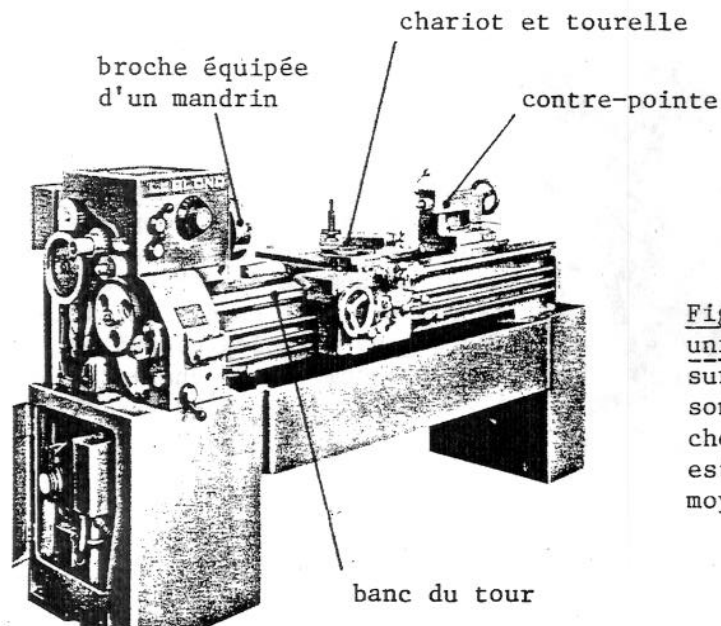


Figure 7.23: Le tour parallèle universel. Un outil est monté sur la tourelle. Les avances sont automatiques mais à enclenchement manuel. Ce type de tour est courant dans les petits et moyens ateliers d'usinage.

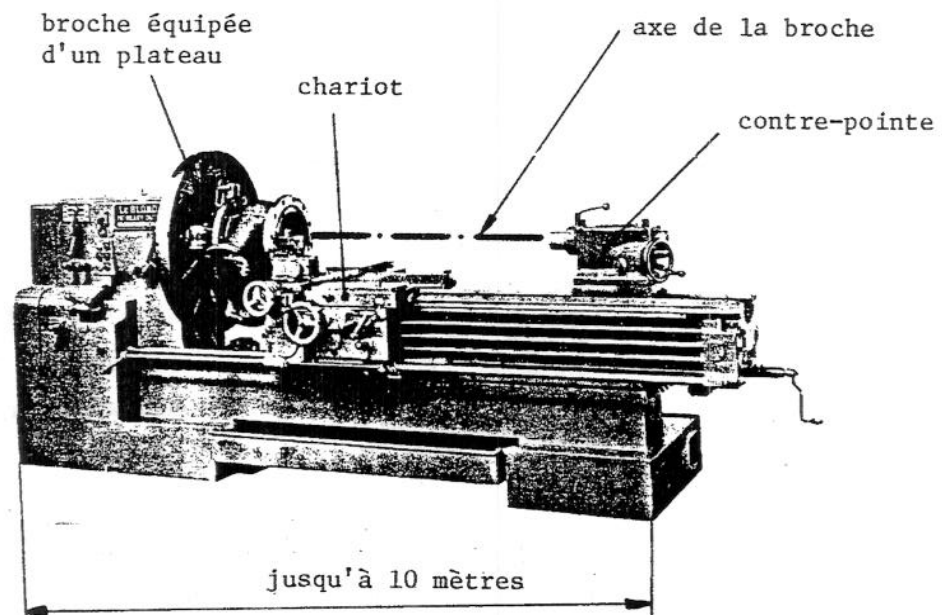


Figure 7.24: Tour horizontal pour gros travaux. Ce tour peut usiner de longues pièces de grands diamètres. L'automatisation est semblable à celle du tour universel.

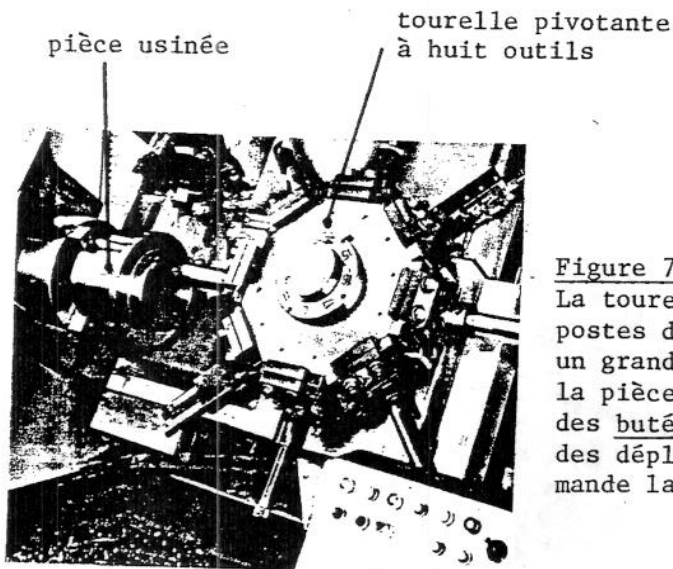


Figure 7.25: Le tour semi-automatique.  
La tourelle révoluer comprend six ou huit postes d'outils, ce qui permet d'exécuter un grand nombre d'opérations sans démonter la pièce. Pour chaque opération d'outil, des butées réglables contrôlent la course des déplacements du chariot. Ce tour demande la présence d'un opérateur.

Le tour automatique: Ce tour, analogue au tour semi-automatique, est entièrement automatisé (sélection d'outils, changement de vitesse de rotation et d'avance, contrôle des déplacements des outils). Il fonctionne sans opérateur. Il existe sous plusieurs versions, figure 7.26:

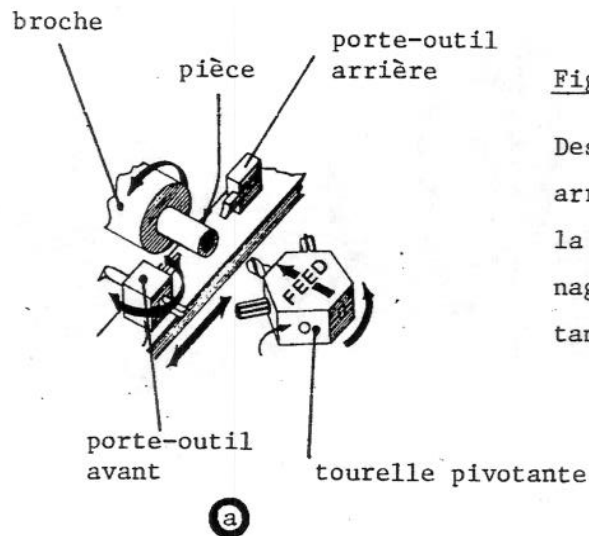


Figure 7.26.a :

Des postes d'outils avant et arrière sont ajoutés à ceux de la tourelle révoluer. Des usinages peuvent avoir lieu simultanément.

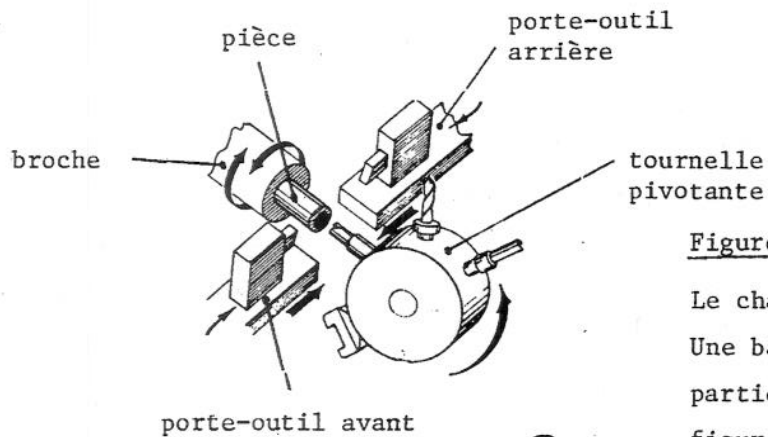


Figure 7.26.b et c :

Le changement de pièces est automatique. Une barre brute est installée dans la partie sombre à l'arrière du tour de la figure c. Le serrage et l'avancement de la pièce se font automatiquement en séquence.

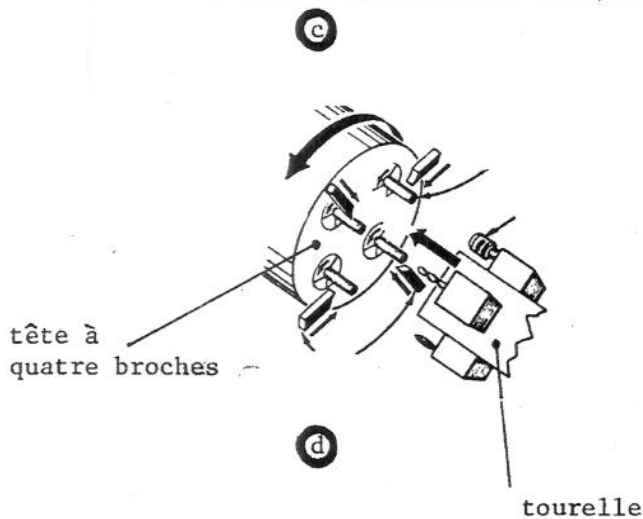
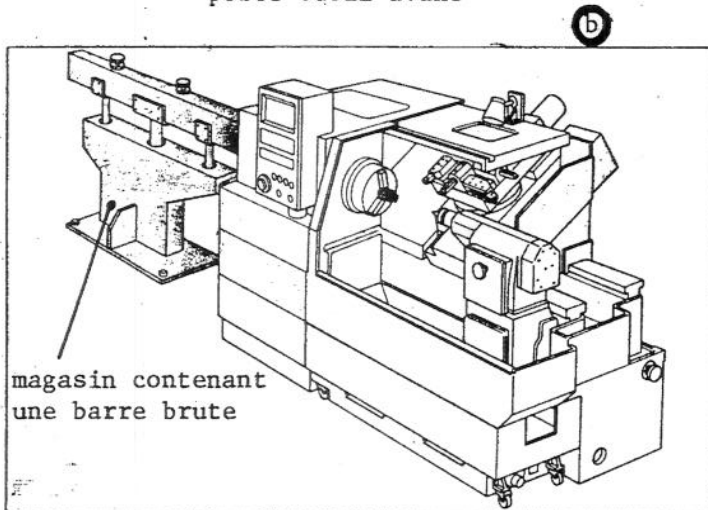


Figure 7.26.d :

Le tour comprend quatre broches avec quatre pièces. De nombreux outils sont disposés autour des broches. Les broches se déplacent devant les outils. Ce type de tour est très productif.

Figure 7.26: Le tour automatique - (a), (b,c), (d) les différentes versions de tour automatique. Ce tour est utilisé pour les grandes séries; son réglage demande une main-d'oeuvre qualifiée.

Le tour à commande numérique: Ce tour peut inclure quelques ou toutes les options du tour automatique. Les déplacements d'outils sont commandés numériquement; des formes non rectilignes peuvent être programmées.

Le tour à commande numérique s'adapte mieux aux travaux par lots que le tour semi-automatique. Toute forme de programmation est enregistrée sur bande magnétique et peut être facilement réutilisée sans de longs réglages.

#### Les usinages réalisables et les outils

Les usinages réalisables au tour qu'ils soient extérieurs ou intérieurs à la pièce sont nombreux et pour chacun d'entre eux correspond un outil approprié. La figure 7.27 montre le profil des outils couramment utilisés ainsi que les formes qu'ils usinent.

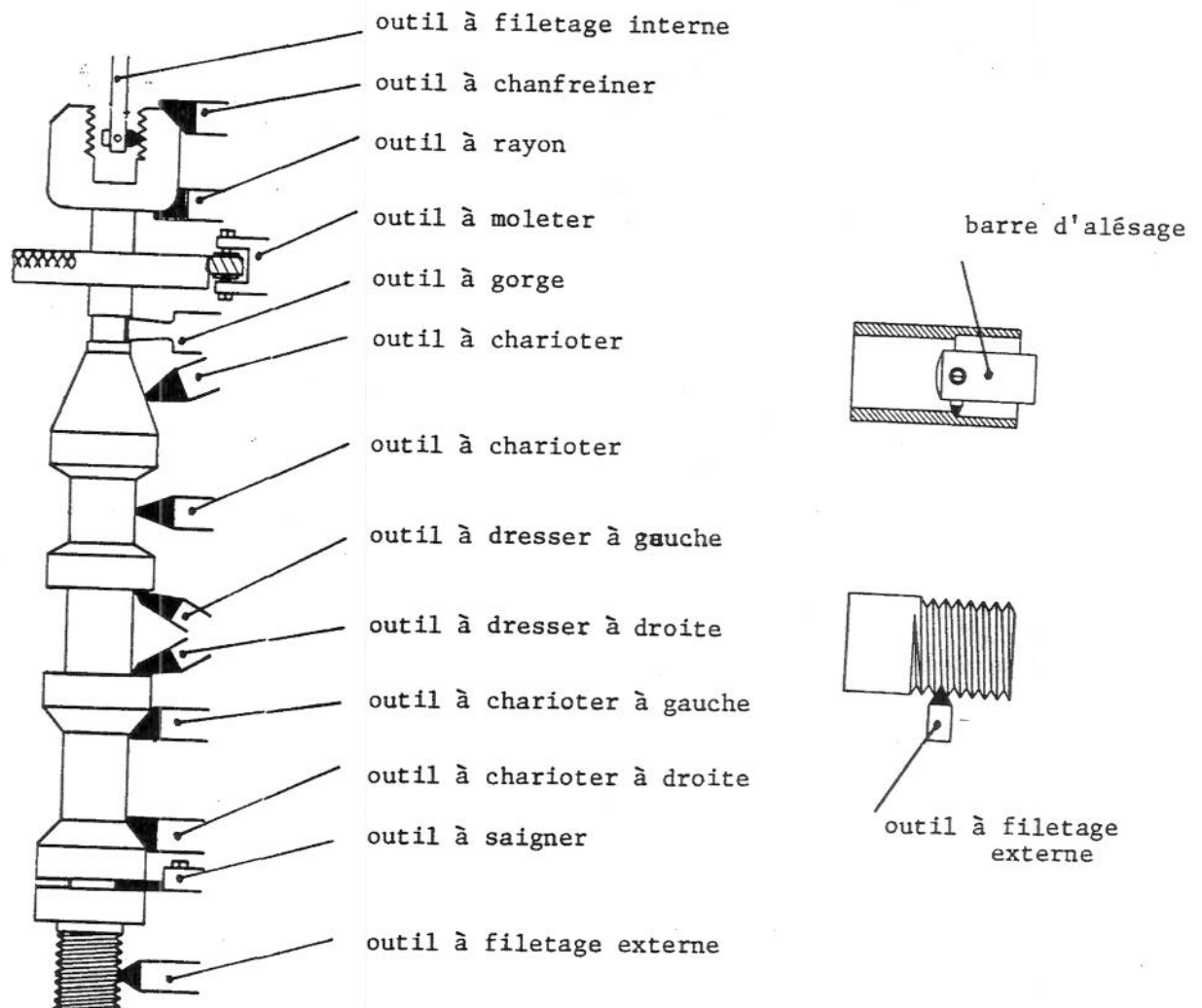
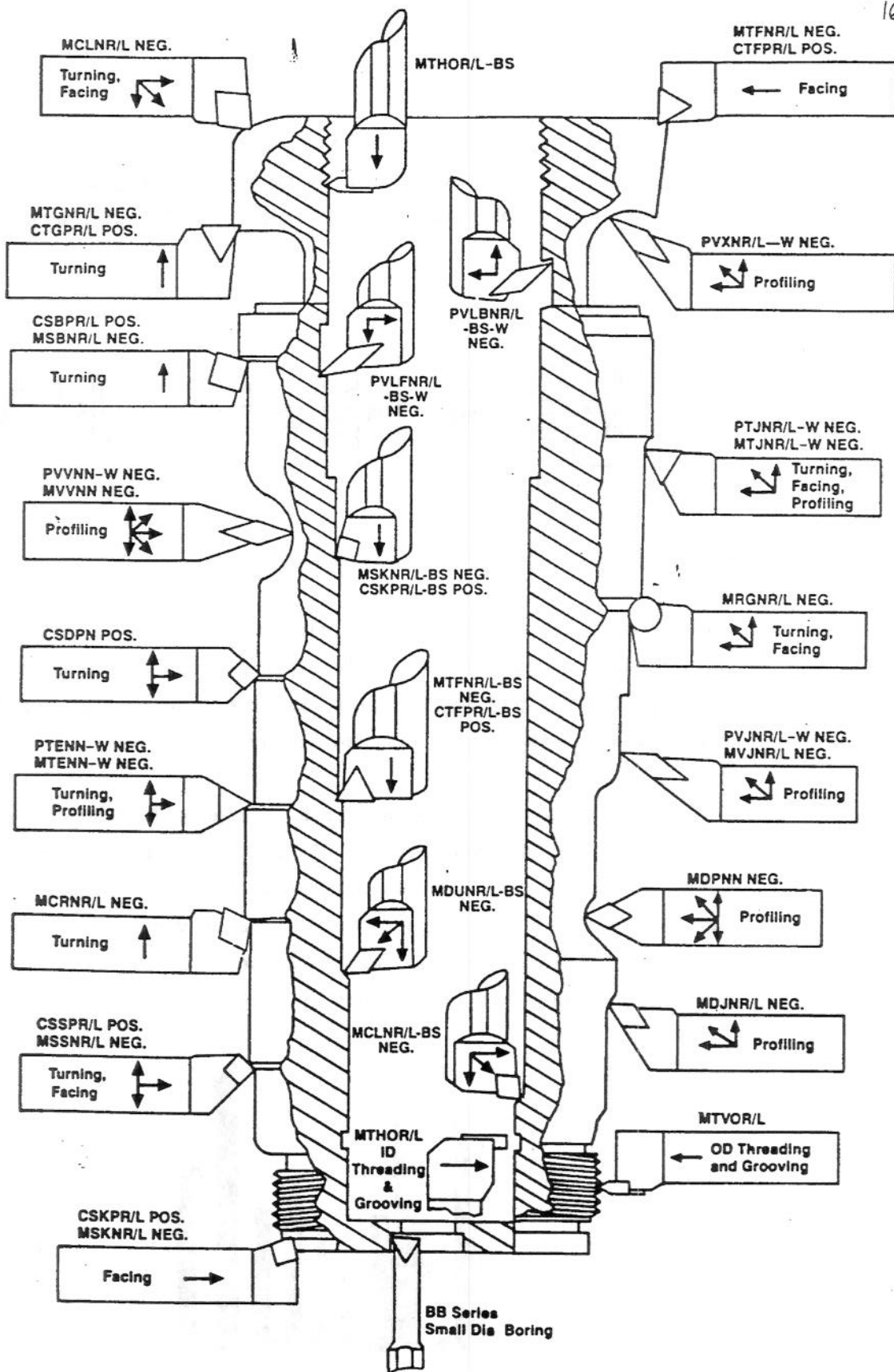


Figure 7.27: Usinages communs réalisables en tournage et présentation des outils.





## TOOL SELECTION GUIDE

Des travaux de perçage concentriques à l'axe de la broche peuvent également être exécutés sur le tour. A la figure 7.28, la pièce tourne sur la broche alors que le foret ou l'alésoir s'avance dans la pièce sans tourner.

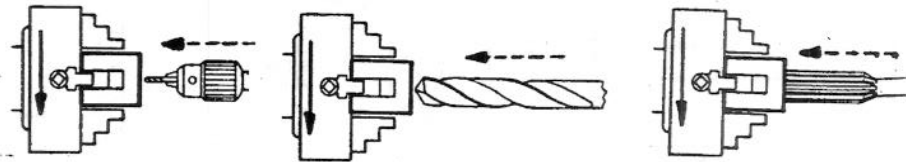


Figure 7.28: Des travaux de perçage exécutés sur un tour.

Des perçages occasionnels parmi des opérations de tournage sont acceptables au tour surtout si la pièce n'a pas à être démontée. Par contre, il n'est pas logique de réaliser que du perçage sur un tour, cette machine étant plus coûteuse qu'une perceuse.

Toutes les outils dessinées à la figure 7.27 sont disponibles en acier rapide ou sous forme de plaquettes de carbures ou de céramiques. En production, les plaquettes sont très répandues, elles sont bridées ou visées sur le porte-outil. Leurs vitesses de coupe sont près de dix fois celles des aciers rapides. La figure 7.29 montre quelques portes-outils et plaquettes de tournage.

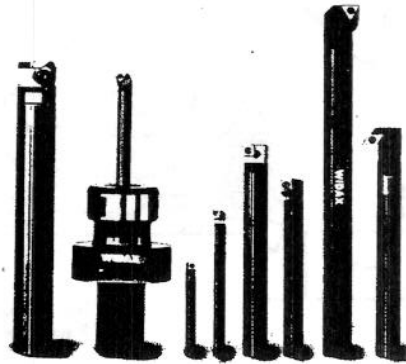
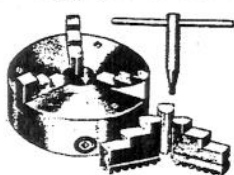


Figure 7.29: Les outils de tournage à plaquette.

### Les systèmes de fixation et de support de la pièce

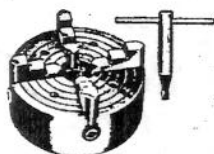
La pièce peut être fixée sur la broche par :

- un mandrin trois mors concentriques (figure 7.30.a)
- un mandrin quatre mors indépendants (figure 7.30.b)
- une pince de serrage concentrique appelée collet (figure 7.30.c)



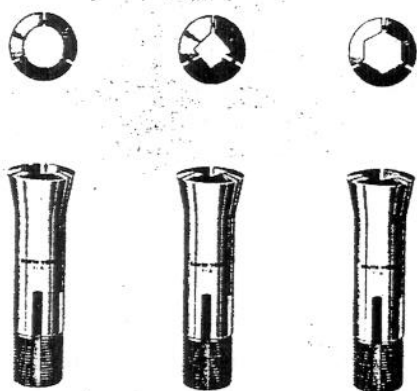
(a)

Le mandrin trois mors concentriques - Ce système de serrage rapide est surtout manuel. Attention, une pièce démontée et remontée sur le mandrin ne revient pas parfaitement dans l'axe de la broche (défaut de coaxialité moyen =  $\phi$  0.1 à  $\phi$  0.3 mm)



(b)

Le mandrin quatre mors indépendants permet de fixer des pièces excentrées ou de contour carré ou rectangulaire. Ce système de serrage n'existe que manuel et s'adapte mal à la production.



profil  
rond

profil  
carré

profil  
hexagonal

(c)

Les pincettes de serrage concentrique. Système de serrage rapide qui conserve une excellente concentricité. Il est beaucoup utilisé sur les tours automatiques. Un type de pince est disponible pour chaque profil de barre à usiner.

Figure 7.30: Les systèmes de serrage de pièce sur la broche.

### Le montage entre pointes

Le système de positionnement et de serrage entre pointes présente de grands avantages. Au préalable la pièce reçoit deux points de centre à chacune de ses extrémités avec un foret à centrer, voir la figure 7.16. Ces points de centre s'appuieront sur les pointes. L'une de ces pointes tourne avec la broche et l'autre fait office de contre-pointe. L'entraînement en rotation de la pièce est assuré par un toc bloqué sur celle-ci, tel que montré à la figure 7.31.

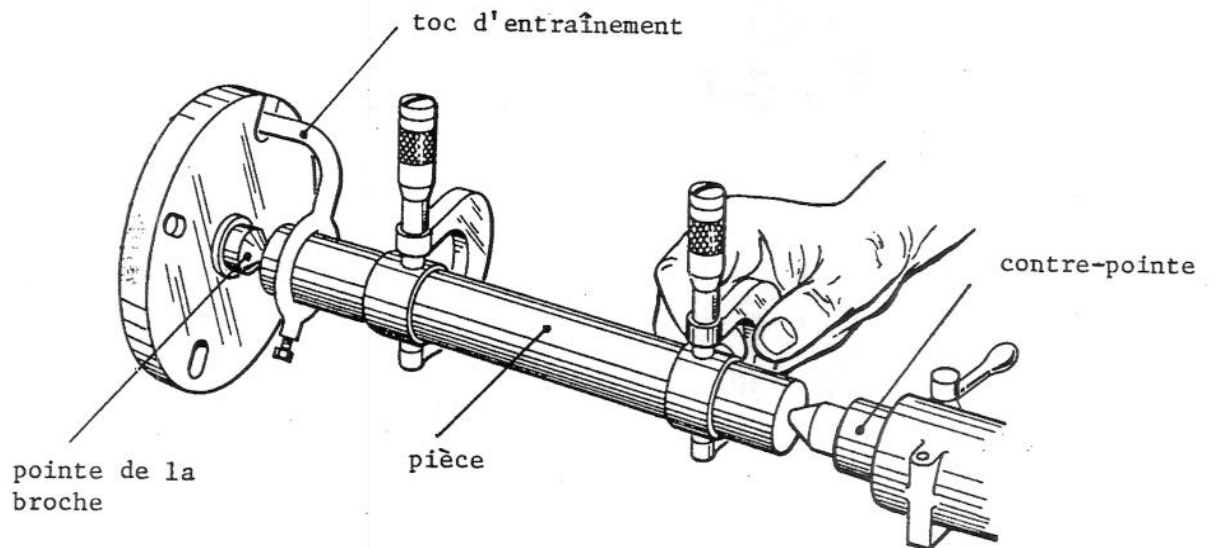


Figure 7.31: Le montage entre pointes. Le toc assure l'entraînement en rotation de la pièce. L'axe de rotation de la pièce est l'axe défini entre les deux pointes.

Ce système de serrage est rapidement installé et permet de retrouver un parfait positionnement axial de la pièce après démontage. Il n'est pas adapté sur les tours automatiques.

### Le montage en lunette

Le tournage de longues pièces pose un problème surtout lorsque la pièce fléchit sous les efforts de coupe, l'usinage est alors totalement faussé. Le montage en lunette supporte concentriquement la pièce près des points d'application des efforts de coupe et évite ainsi tout fléchissement possible de la pièce.

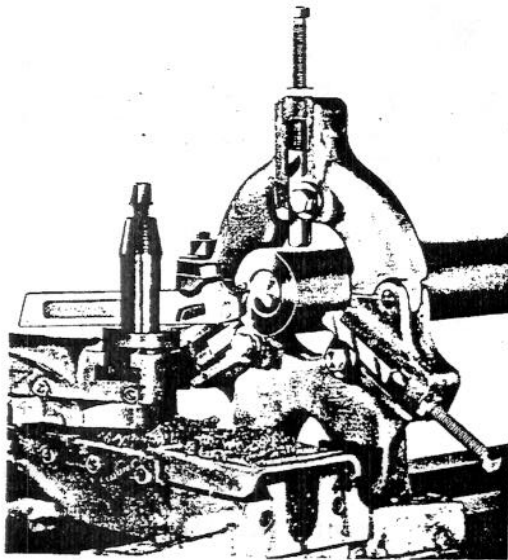
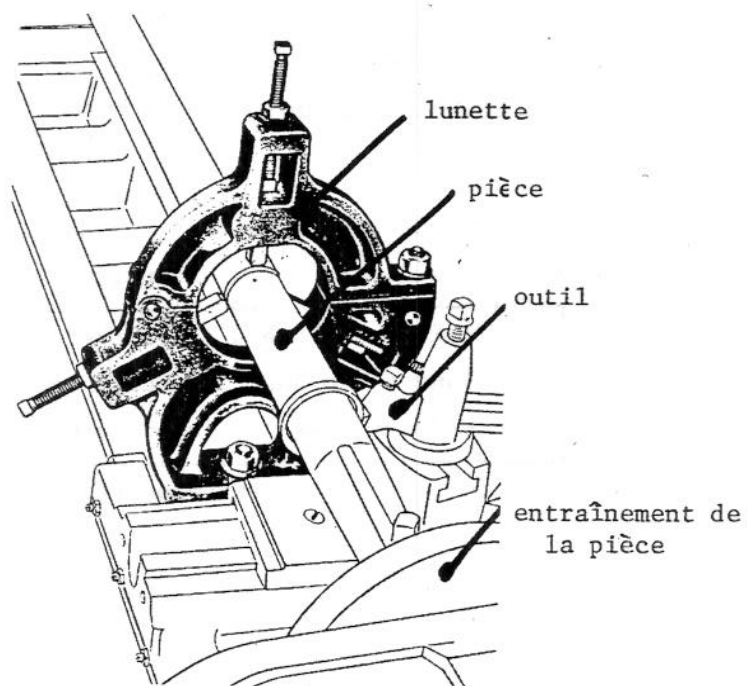

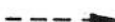


Figure 7.32: Le montage en lunette.  
La lunette offre trois appuis concentriques proches des surfaces à usiner; tout fléchissement de la pièce est ainsi évité.



7.3.d) Le fraisageLe principe du fraisageLe fraisage horizontal

- légende:  mouvement de coupe ( $V_c$ )  
 mouvement d'avance ( $V_a$ )

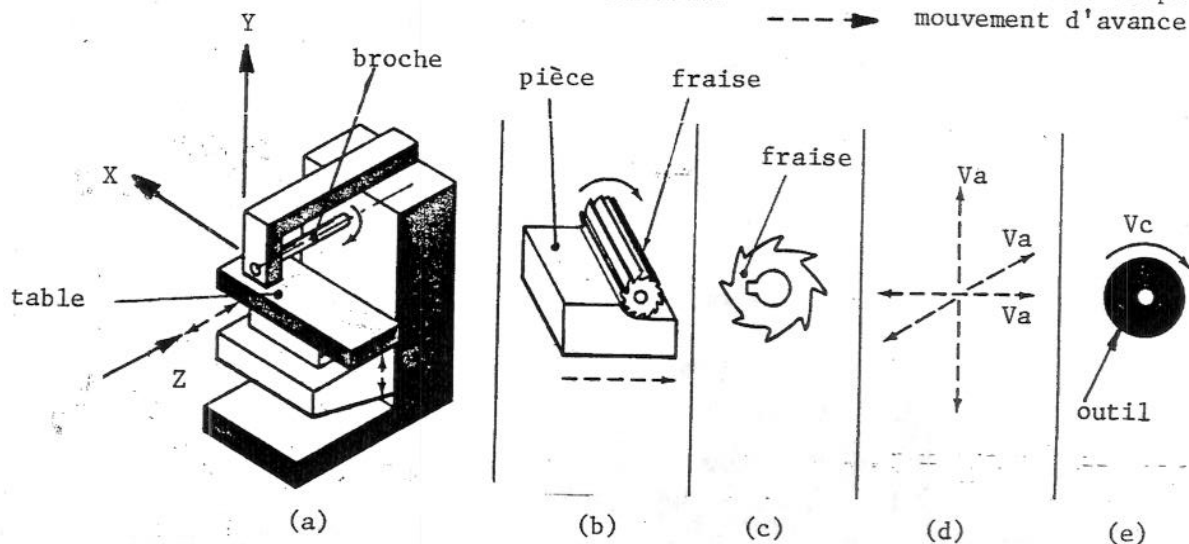


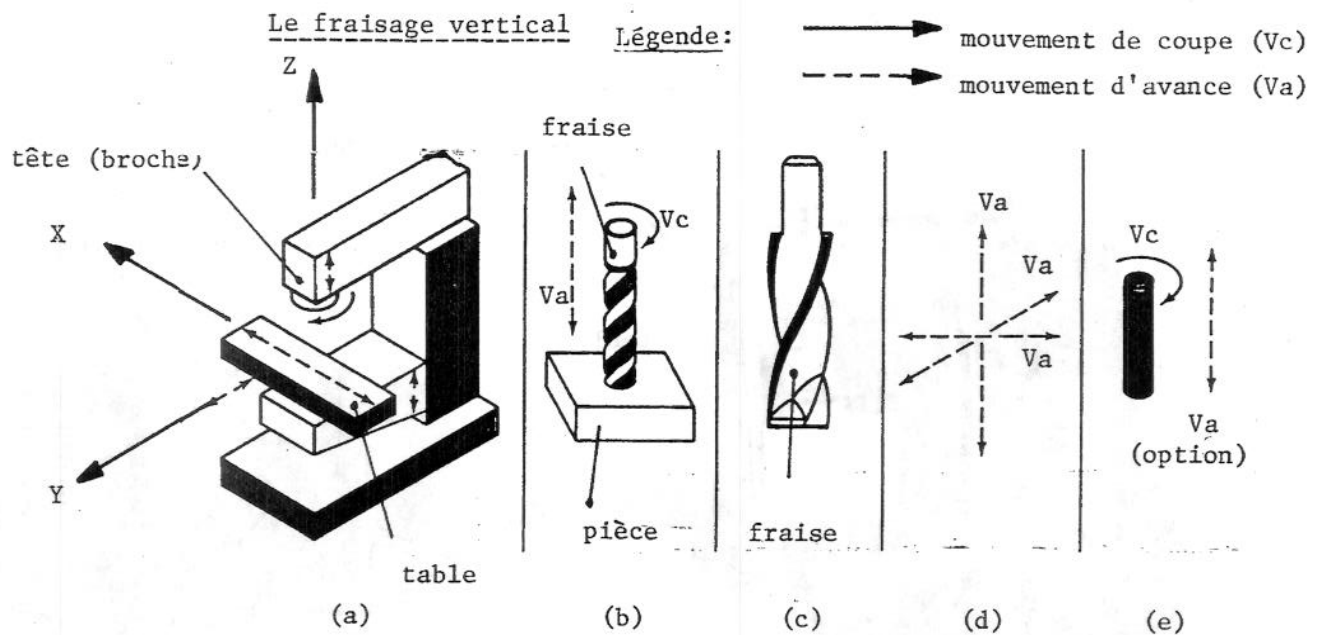
Figure 7.33: Principe du fraisage horizontal. L'axe de la broche est horizontal.

- (a) La machine: L'outil est monté sur l'axe de la broche où il tourne. La pièce est serrée sur la table, trois mouvements orthogonaux peuvent lui être imposés.
- (b) Le procédé: La fraise (outil) tourne et la pièce avance.
- (c) L'outil: La fraise possède plusieurs dents.
- (d) Mouvement de la pièce: La vitesse d'avance ( $V_a$ ) est imposée sur un des trois axes orthogonaux.
- (e) Rotation de l'outil: La vitesse de rotation de la fraise doit respecter la vitesse de ( $V_c$ ) désirée.

Dans toute programmation sur machine à commande numérique, les trois axes d'avance sont identifiés comme suit:

z, l'axe parallèle à la broche  
x, l'autre axe dont la course est la plus grande  
y, le dernier axe (à faible course)

Cette convention est respectée dans les figures 7.33 et 7.34.



**Figure 7.34:** Principe du fraisage vertical. L'axe de la broche est vertical.

- (a) La machine - L'outil est monté sur l'axe de la broche et la pièce installée sur la table peut avancer suivant trois axes.
- (b) Le procédé - La fraise tourne et la pièce se déplace.
- (c) L'outil - Voir la section suivante à ce sujet.
- (d) Mouvement de la pièce - La vitesse d'avance (Va) est imposée sur un des trois axes orthogonaux.
- (e) Mouvement de l'outil - La vitesse de coupe (Vc) est respectée par la vitesse de rotation de l'outil.

# Les machines-outils

## La fraiseuse horizontale

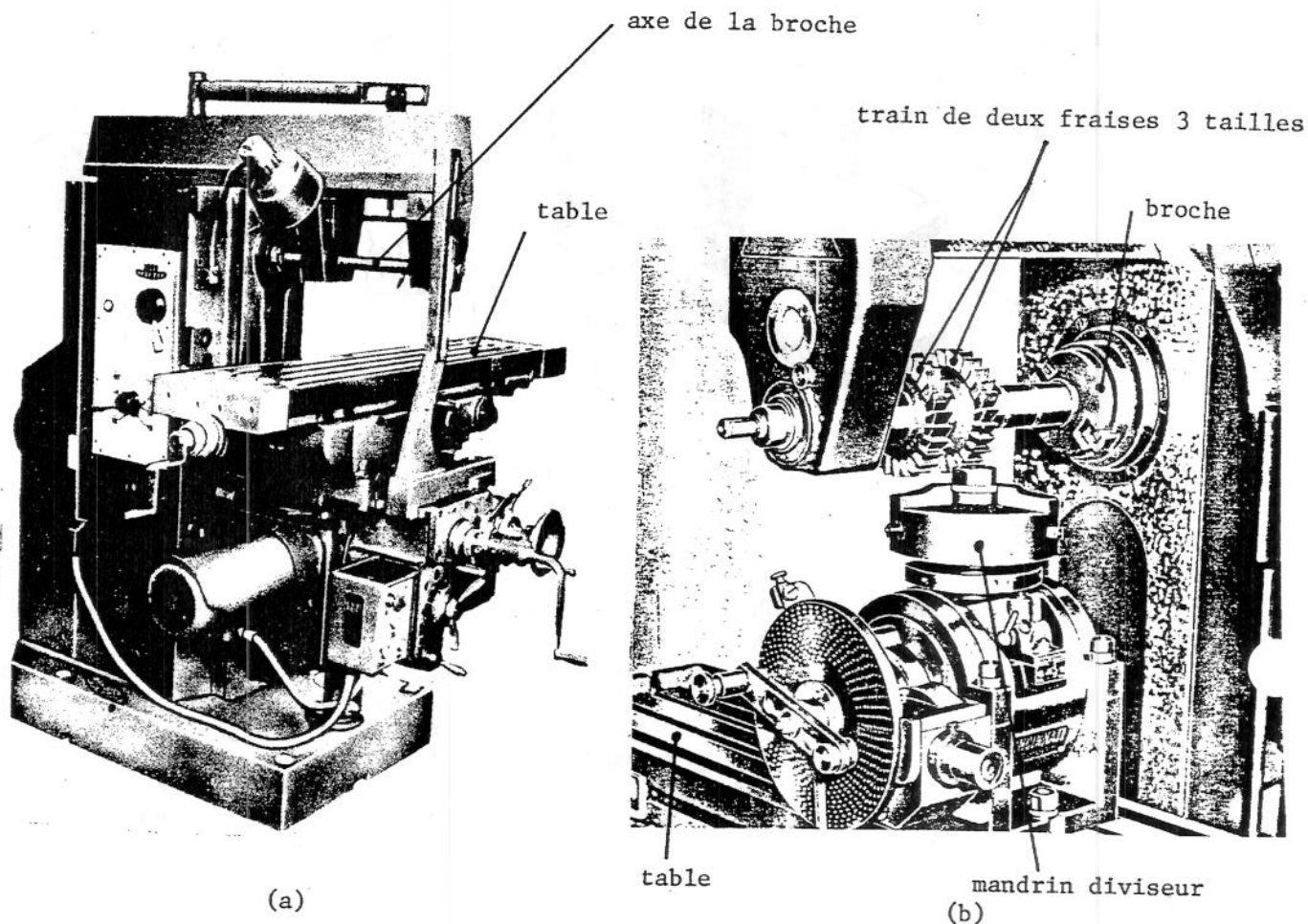


Figure 7.35 (a) La fraiseuse horizontale. L'axe de la broche recevant les outils est horizontal. La machine ci-dessus est semi-automatique car les avances sur les trois axes sont automatiques; ces déplacements peuvent aussi être contrôlés numériquement.

(b) Usinage sur fraiseuse horizontale. Deux fraises trois tailles usinent la pièce montée dans un mandrin rotatif de diviseur.



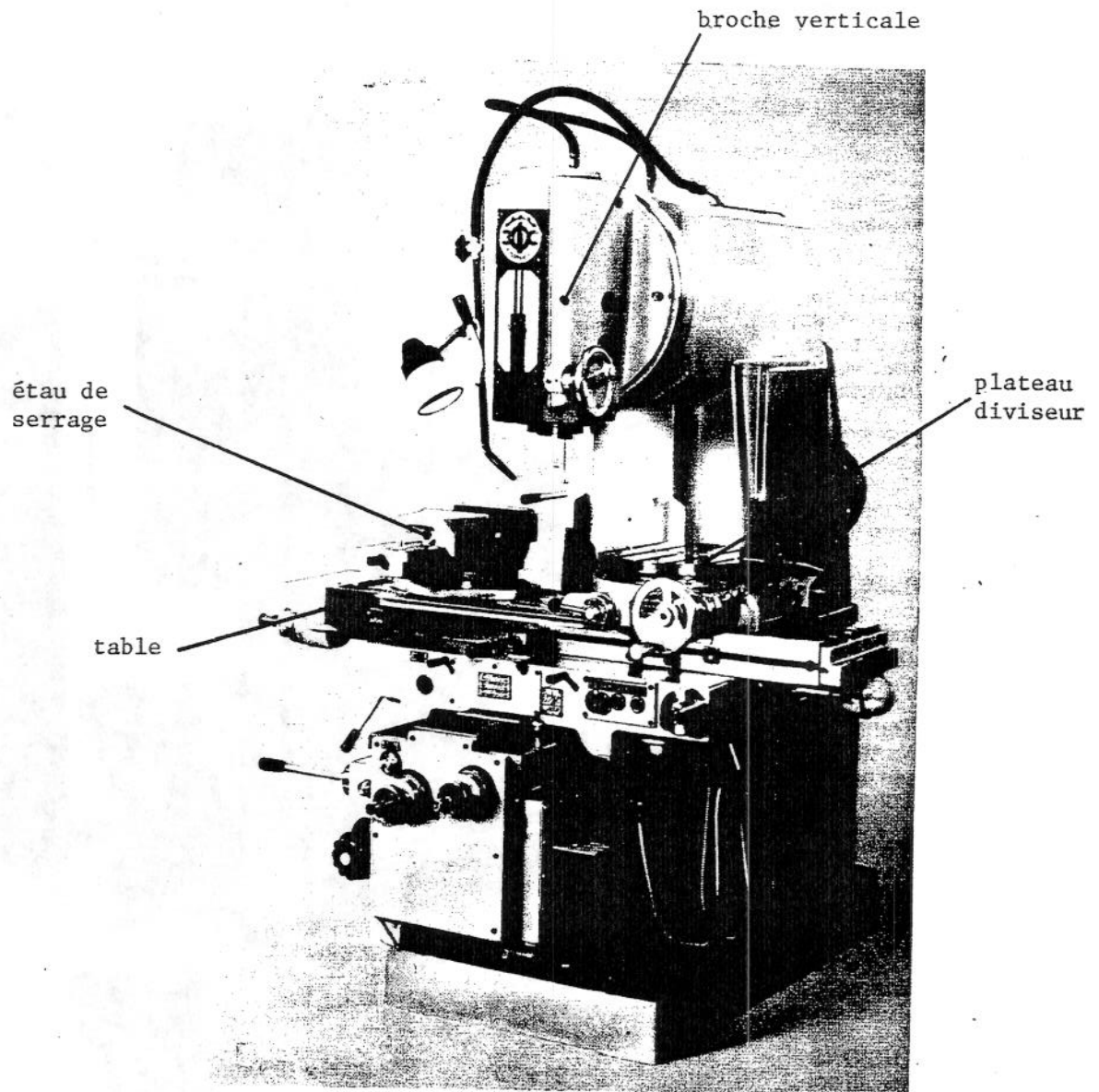


Figure 7.36: La fraiseuse verticale. L'axe de la broche est vertical. Les avances sont automatiques ou contrôlées numériquement. Sur la table de la machine sont montrés un étau et un plateau diviseur (appelée aussi quatrième axe).

Le centre d'usinage

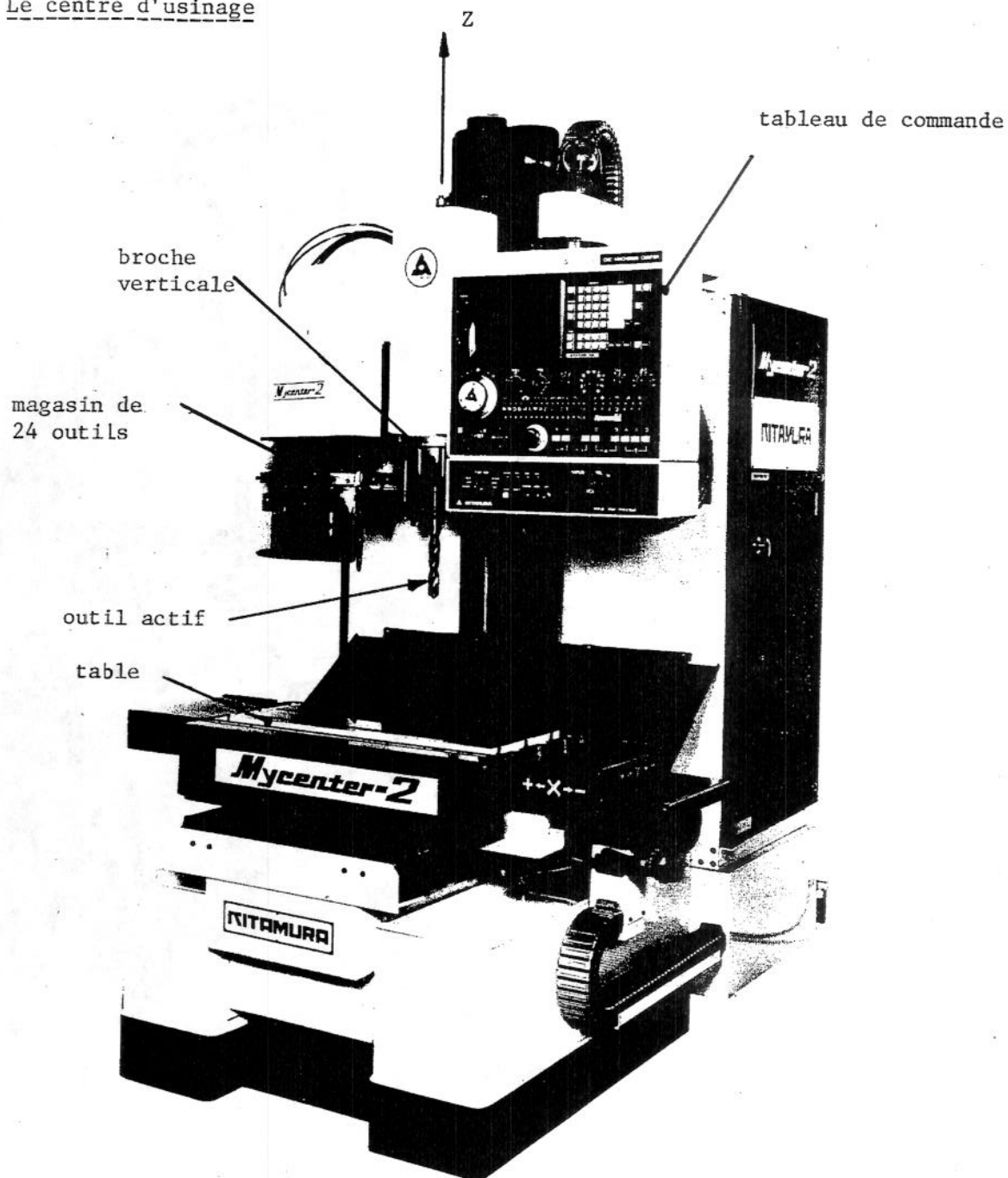
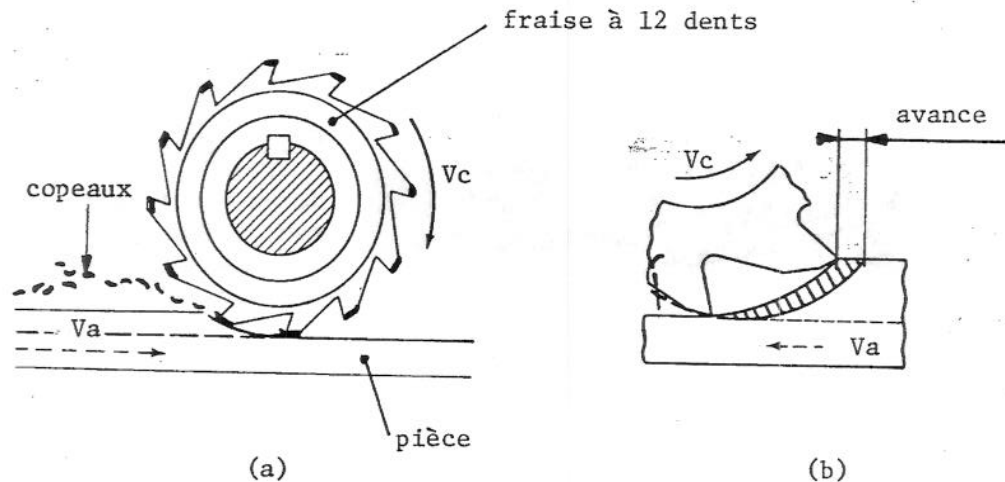


Figure 7.37: Le centre d'usinage. Ce type de machine supplante actuellement la fraiseuse verticale classique de la figure 7.36. Les trois mouvements d'avance sont totalement contrôlés numériquement, remarquer ici le déplacement Z est donné à la broche même.

Les centres d'usinage sont dotés d'un changement d'outils automatique. Chacun des 24 outils du magasin situé à gauche de la broche peut être sélectionné et installé automatiquement dans la broche.

### Les outils et leurs possibilités

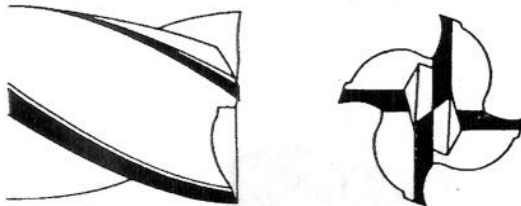
Les outils de fraisage appelés fraises sont des couteaux rotatifs tel que montré à la figure 7.38.a. La notion d'avance en fraisage est l'avancement de la pièce correspondant au passage d'une dent de la fraise. (figure 7.38.b). Au contraire, en tournage l'avance était l'avancement de l'outil pour un tour de la pièce.



**Figure 7.38:** (a) Une fraise est une multitude de couteaux rotatifs.  
(b) L'avance est donnée pour une dent.

### Les fraises deux tailles (ou fraise en bout ou flûte)

Les fraises deux tailles de petits diamètres ( $2 < d < 4$  mm) possèdent seulement deux dents de coupe. Le nombre de dents augmente avec le diamètre de la fraise. Le terme "deux tailles" signifie que la fraise possède deux surfaces de coupe. Les figures suivantes présentent des fraises deux tailles courantes.



**Figure 7.39:** Fraise deux tailles à quatre dents ( $3 < \text{diamètre} < 25$  mm). Il n'est pas conseillé de faire de grosses ébauches avec ces fraises.

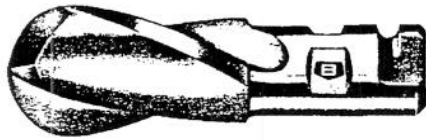


Figure 7.40: Fraise à deux dents à bout sphérique. Ces fraises sont en acier rapide.

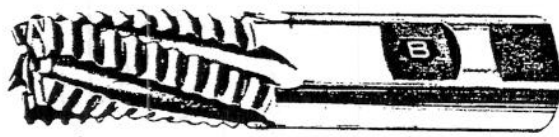


Figure 7.41: Fraise deux tailles "ruffer". Cette fraise en acier rapide au cobalt est utilisée pour des travaux d'ébauche. Les arêtes latérales filetées brisent les copeaux en petits morceaux étroits.

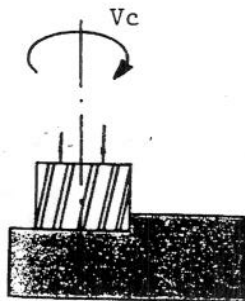
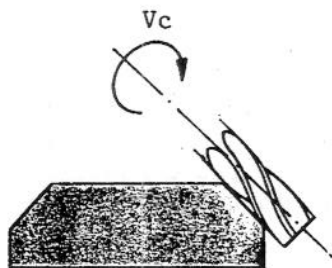
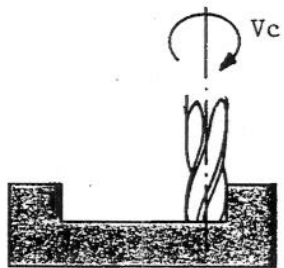
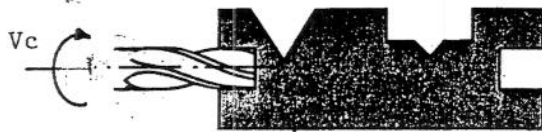


Figure 7.42: Travaux possibles avec des fraises deux tailles.

Les fraises deux tailles présentées ci-dessus ne conviennent pas pour de lourdes ébauches car le corps de fraise ne peut pas reprendre de gros efforts. Pour ces grosses ébauches, la fraise tout usage est conseillée. (figure 7.43)

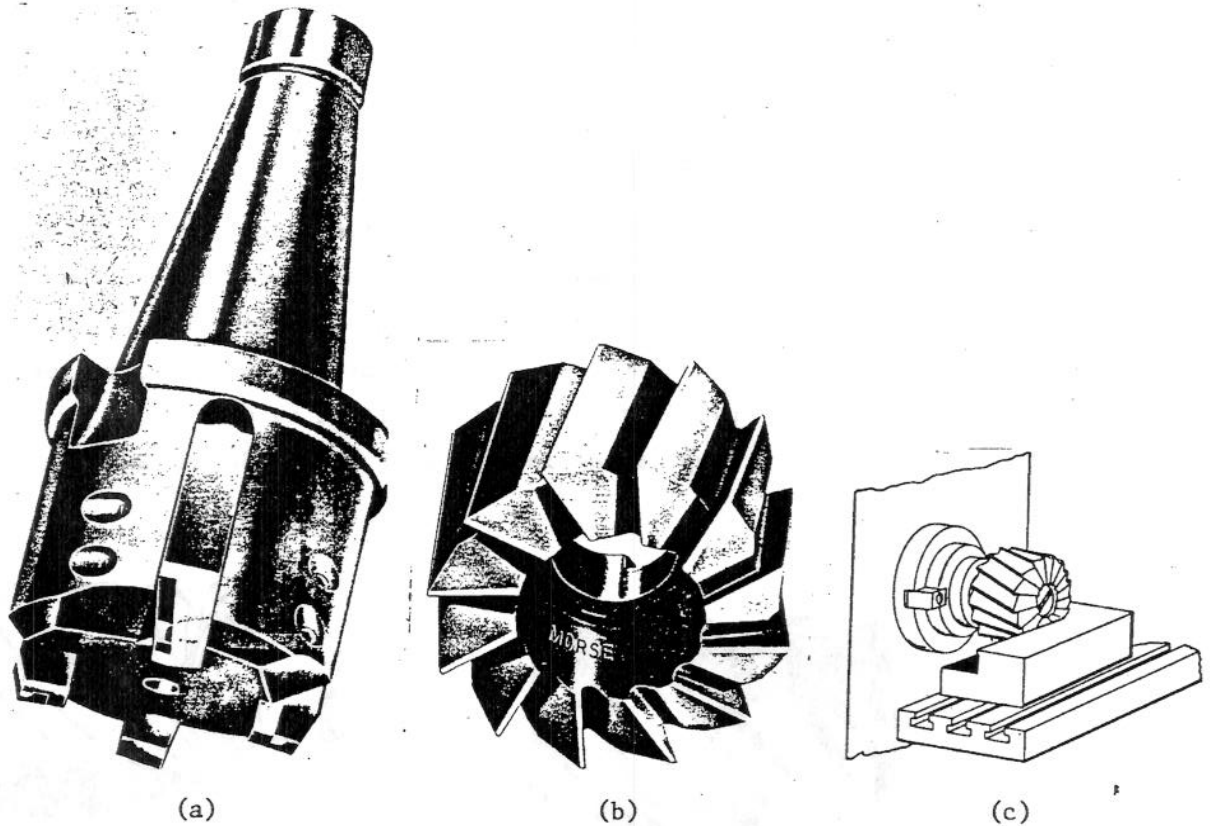
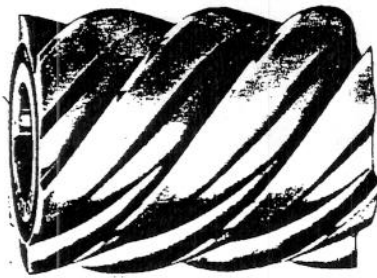


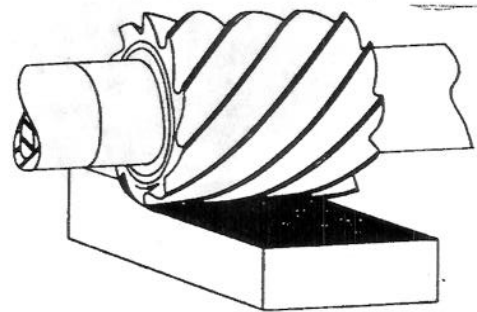
Figure 7.43: (a) La fraise tout usage avec outils rapportés en carbure. Cette fraise appelée "tourteau" sert à surfacer et a un excellent rendement.  
 (b) La fraise tout usage en acier rapide.  
 (c) Travail sur fraiseuse horizontale.

### La fraise à surfacer

Ces fraises, utilisées surtout en fraisage horizontal, sont très robustes et travaillent dans de meilleures conditions que le tourteau. Les arêtes coupantes en forme d'hélice ont pour effet de réduire les chocs: plusieurs arêtes travaillent en même temps et l'effort de coupe se déplace le long de l'arête tranchante.



(a)



(b)

Figure 7.44: (a) La fraise à surfacer.  
(b) Travail sur fraiseuse horizontale.

### La fraise à rainurer en T

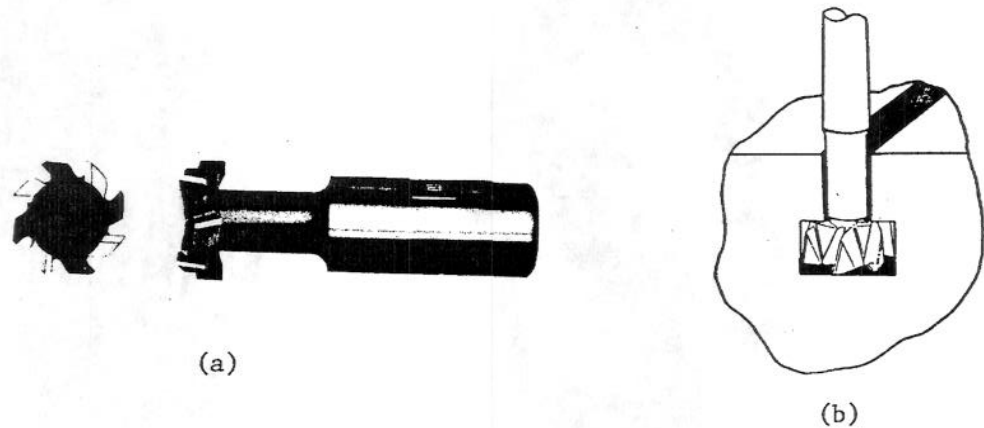


Figure 7.45: (a) La fraise à rainurer en T.  
(b) Travail de la fraise dans une rainure en T.

Le corps de cette fraise étant fragile, lors de grosses ébauches, il est conseillé d'ébaucher la rainure avec une autre fraise, trois tailles de préférence.

### Les fraises trois tailles

Ces fraises circulaires de 25 à 70 mm de diamètre possèdent trois surfaces de coupe. Elles travaillent surtout en fraisage horizontal et peuvent prendre de grosses ébauches. Les fraises sont en acier rapide ou bien des plaquettes de carbure sont rapportées sur une base circulaire comme présenté à la figure 7.46.

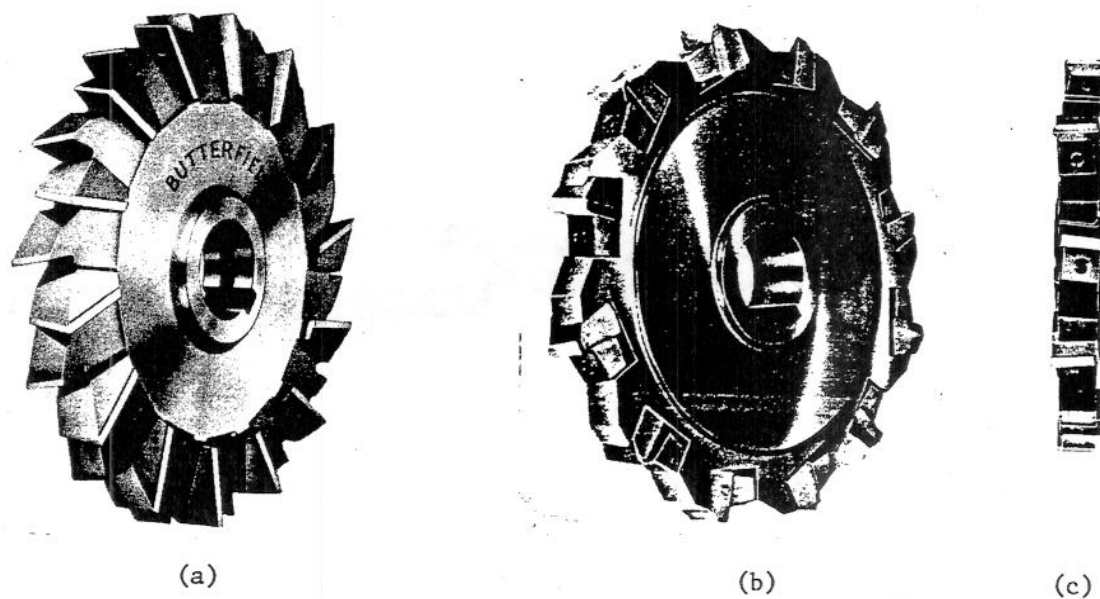


Figure 7.46: La fraise trois tailles (a) en acier rapide - (b) avec plaquettes de carbure. Remarquer les dents qui travaillent alternativement des deux côtés, figure (c).

Les fraises trois tailles peuvent travailler simplement comme à la figure 7.47. Elles présentent aussi l'avantage de pouvoir être montées en train comme à la figure 7.48; une bague intercalée entre les deux fraises permet d'obtenir des cotes outil de qualité 8.

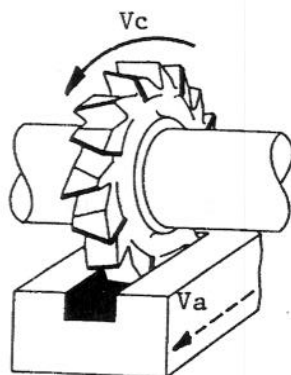


Figure 7.47: Rainurage à la fraise trois tailles.



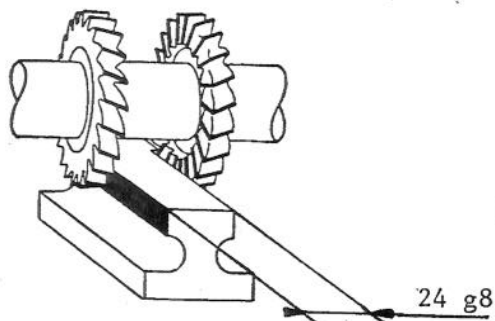


Figure 7.48: Train de deux fraises trois tailles qui permet d'obtenir une cote-outil de qualité 8.

Pour l'usinage des rainures de précision déjà ébauchées, il existe la fraise trois tailles extensible. Cette fraise comprend deux fraises symétriques crénelées qui s'emboîtent l'une dans l'autre. Une bague intermédiaire (interlock) permet de régler la largeur de coupe de la fraise extensible.

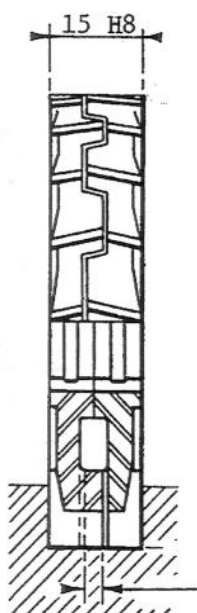


Figure 7.49: La fraise trois tailles extensible. La largeur de coupe est ajustable à l'aide d'une cale intermédiaire.

bague intermédiaire

### La fraise scie

La fraise scie est une fraise trois tailles mince. Les plus minces fraises scie n'ont pas d'arêtes tranchantes latérales. Ces fraises permettent de scier ou bien d'usiner des rainures étroites et profondes.

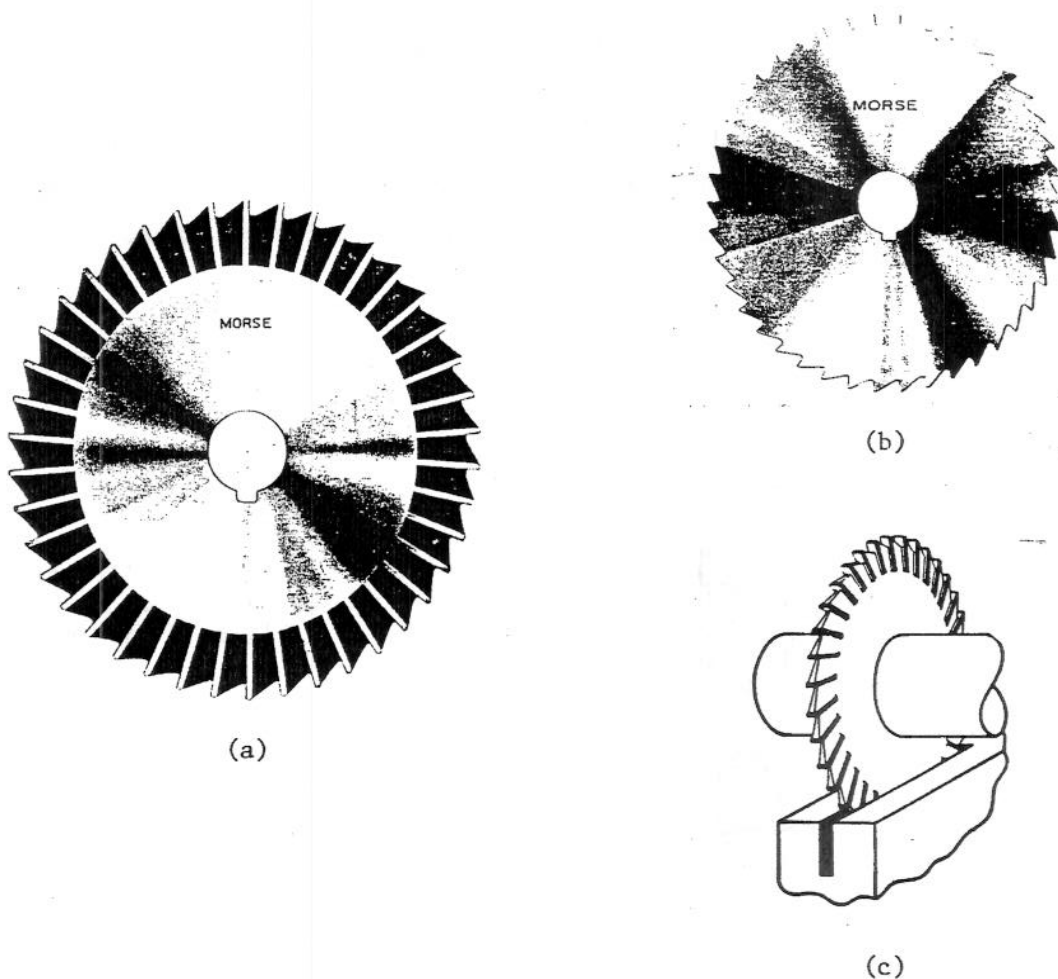


Figure 7.50: (a) Fraise scie, largeur de coupe supérieure à 2 mm.  
 (b) Fraise scie, largeur de coupe inférieure à 2 mm jusqu'à 0.5 mm (20/1000 po)  
 (c) Travail d'une fraise scie.

### Les fraises de forme

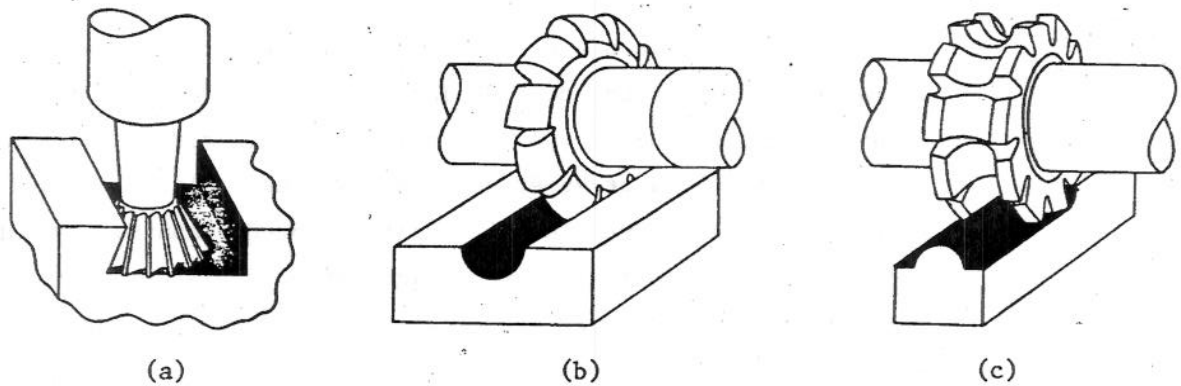


Figure 7.51: Les fraises de forme - (a) à queue d'aronde - (b) convexe (c) concave. Le terme concave et convexe est attribuable à la forme de la fraise.

### Les paramètres de coupe

#### La vitesse de coupe

La table 7.3 donne les vitesses de coupe moyennes suggérées en fraisage avec des fraises en acier rapide et en plaquettes de carbures pour différents matériaux.

| <u>Matériau à usiner</u> | <u>FRAISE EN</u>    |                 |
|--------------------------|---------------------|-----------------|
|                          | <u>Acier rapide</u> | <u>carbures</u> |
| Aluminium                | 210 (700)           | 480 (1600)      |
| Fonte                    | 20 (70)             | 55 (180)        |
| Acier mi-dur             | 27 (90)             | 65 (220)        |
| Acier dur                | 15 (50)             | 50 (160)        |

Table 7.3: Vitesses de coupe moyennes suggérées en fraisage. Les vitesses sont données en m/min (pi/min). Remarquer que les carbures ont des vitesses de coupe près de trois fois supérieures de celles des aciers rapides.

Les équations 7.1 et 7.2 développées dans la section perçage sont valides en fraisage pour calculer les vitesses de rotation des fraises où D sera maintenant le diamètre de la fraise.

### L'avance de coupe

L'avance de coupe utilisée en fraisage est l'avance de la pièce durant le passage d'une dent de la fraise. Elle est exprimée en mm/dent ou po/dent et dépend du type de fraise et de la matière à usiner. Les avances d'ébauche sont supérieures à celle de finition où le fini et l'état de surface sont alors les critères prédominants. La table 7.4 donne quelques valeurs d'avance suggérées en fraisage. Les valeurs sont exprimées en mm/dent pour des outils en acier rapide; les données entre parenthèses correspondent aux fraises en carbures.

| <u>Type de fraise</u> | <u>Matériau à usiner</u> |             |              |            |
|-----------------------|--------------------------|-------------|--------------|------------|
|                       | Aluminium                | Fonte       | Acier mi-dur | Acier dur  |
| Fraise tout usage     | 0.6 (0.5)                | 0.3 (0.4)   | 0.3 (0.4)    | 0.2 (0.35) |
| Fraise deux tailles   | 0.3 (0.25)               | 0.17 (0.2)  | 0.15 (0.2)   | 0.1 (0.17) |
| Fraise trois tailles  | 0.3 (0.3)                | 0.17 (0.25) | 0.17 (0.22)  | 0.12 (0.2) |
| Fraise de forme       | 0.17 (0.17)              | 0.1 (0.1)   | 0.1 (0.1)    | 0.07 (0.1) |
| Fraise scie           | 0.12 (0.12)              | 0.07 (0.1)  | 0.07 (0.1)   | 0.05 (0.1) |

Table 7.4: Avances par dent en fraisage exprimées en millimètres par dent. Les premières valeurs correspondent aux fraises en acier rapide tandis que celles entre parenthèses se rapportent aux fraises en carbures. Remarquer que les carbures tolèrent des avances proches de celles des aciers rapides.

### Calcul de la vitesse d'avance

À partir du tableau ci-dessus donnant l'avance de matière par dent, la vitesse d'avance peut être calculée comme suit :

$$\text{Vitesse d'avance} = (\text{vitesse de rotation}) \times (\text{nombre de dents de la fraise}) \times (\text{avance par dent})$$

Sur les machines-outils, l'avance se programme en millimètres par minute.

### La commande numérique en fraisage

La commande numérique est un moyen qui permet de programmer les déplacements de la pièce par rapport à l'outil. Ces déplacements peuvent être commandés en séquence ou simultanément sur les axes d'avance. Des profils courbes sont ainsi facilement obtenus; autrefois cela nécessitait des fraiseuses à copier. La figure 7.52.a représente un profil à obtenir. A partir du profil souhaité, la programmation précise le déplacement de l'axe de la fraise.

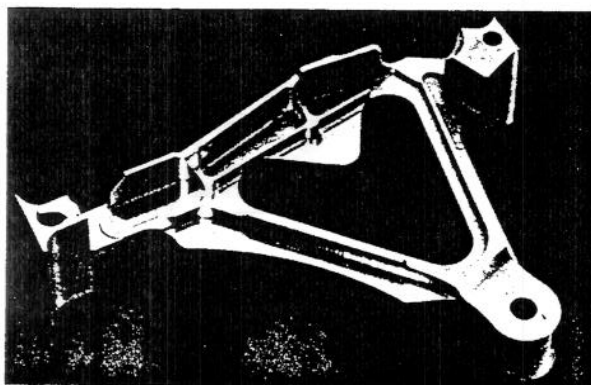
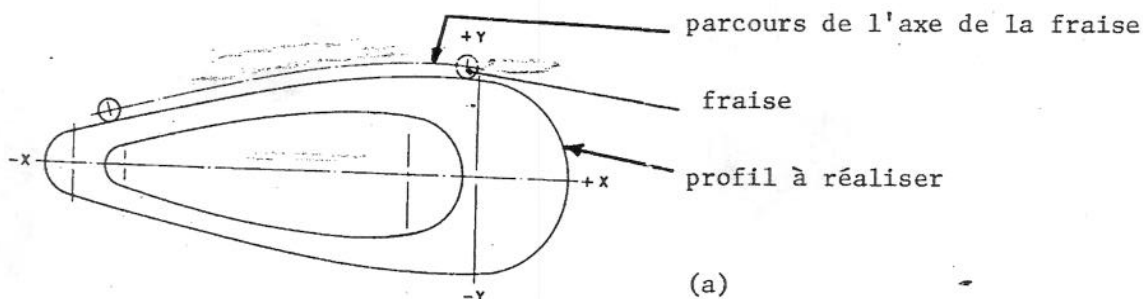


Figure 7.52: La commande numérique en fraisage - (a) Profil à obtenir et chemin de la fraise - (b) Pièce réalisée en fraisage à commande numérique.

### 7.3.e) Le rabotage

Il existe deux principes de rabotage différenciés par la cinématique de la machine.

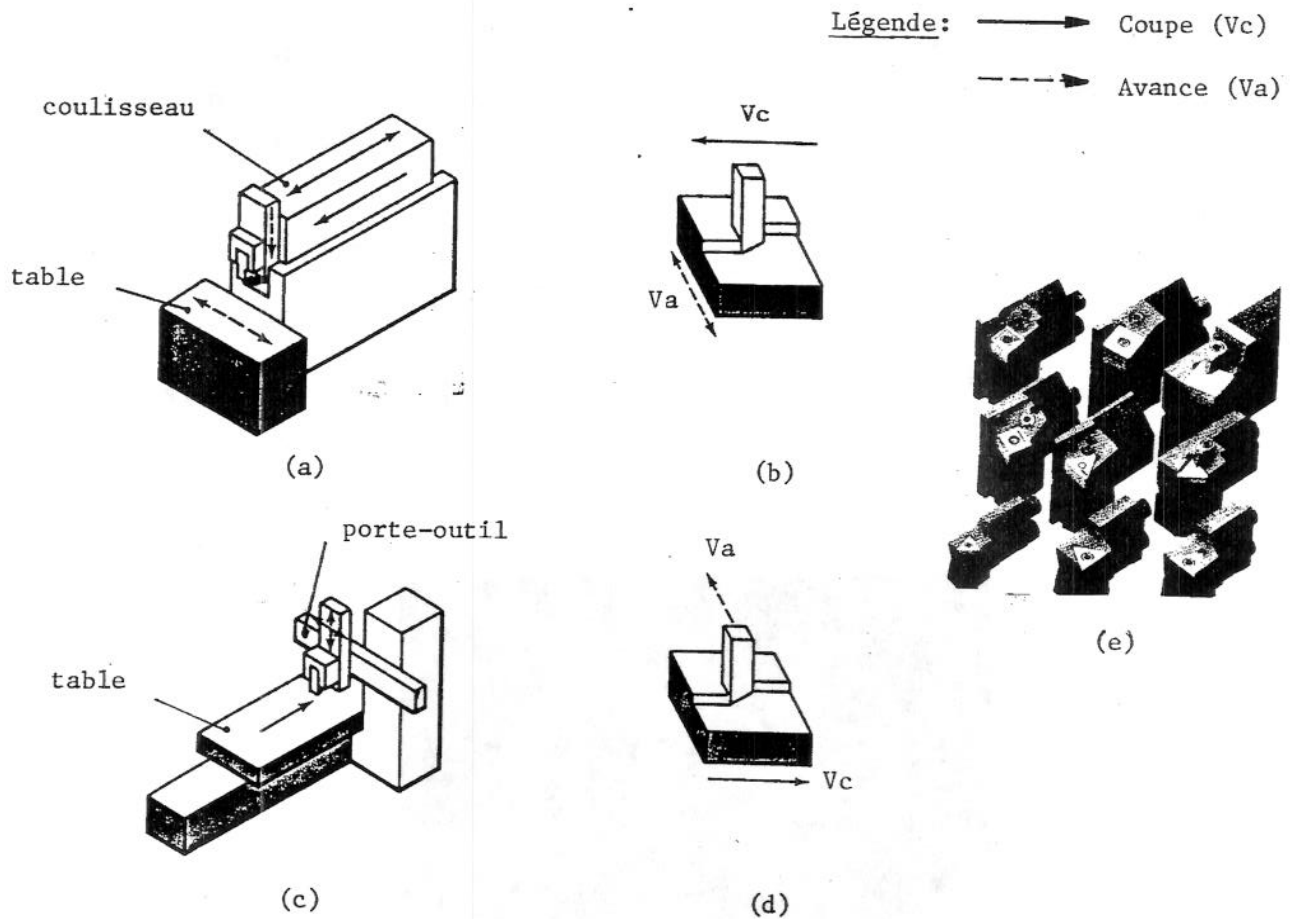


Figure 7.53: Principe de rabotage

- (a) La pièce est montée sur la table et l'outil, sur le coulisseau, va et vient. La machine-outil est appelée étiau-limeur.
- (b) Le mouvement d'avance ( $V_a$ ) est imposé à la table et donc à la pièce. Le coulisseau pousse l'outil dans la pièce à la vitesse de coupe ( $V_c$ ).
- (b) et (c). La vitesse de coupe ( $V_c$ ) est maintenant imposée à la pièce montée sur la table. C'est l'outil qui reçoit le mouvement d'avance ( $V_a$ ).
- (e) L'outil, très semblable aux outils à dresser de tournage, est plus robuste.

A la figure 7.54, un outil de rabotage retire un copeau d'une pièce. Le profil du copeau a les dimensions suivantes:

- l'avance
- la profondeur de passe,  $p$  (couche de matière retirée)

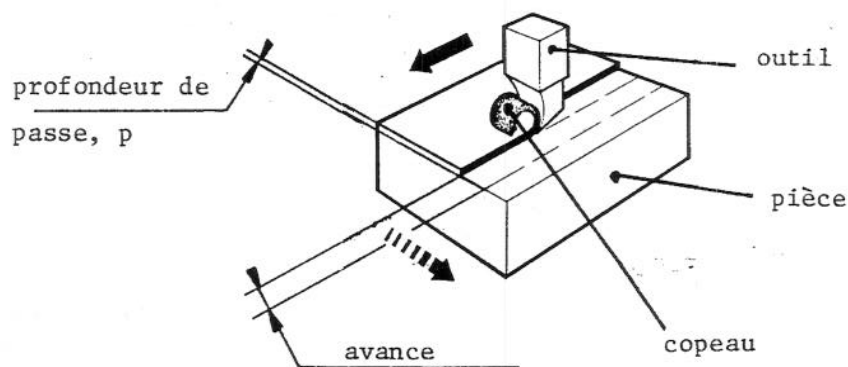


Figure 7.54: L'usinage par rabotage.

De nos jours, le rabotage est devenu un procédé d'usinage désué. Les nouvelles technologies se sont mal adaptées à l'étau-limeur de la figure 7.53.a. Seules de grandes raboteuses industrielles d'après le principe de la figure 7.53.c sont utiles dans l'industrie pour l'usinage de longues surfaces.

### 7.3.f) Le brochage

Le brochage est un procédé qui permet d'usiner rapidement, à l'aide de broches, les surfaces intérieures et extérieures. Une broche est un outil de coupe à dents multiples. Comme montré à la figure 7.55, chaque dent, décalée de la précédente d'une quantité égale à l'épaisseur du copeau, participe à l'usinage.

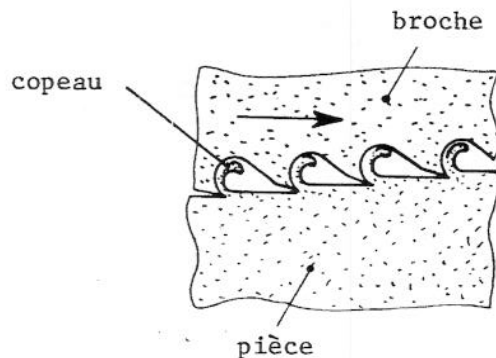
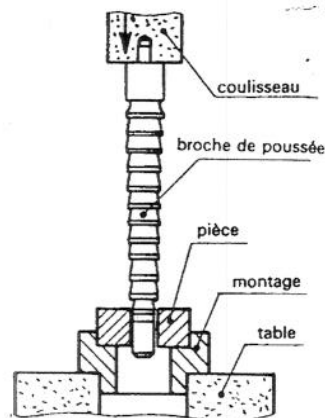


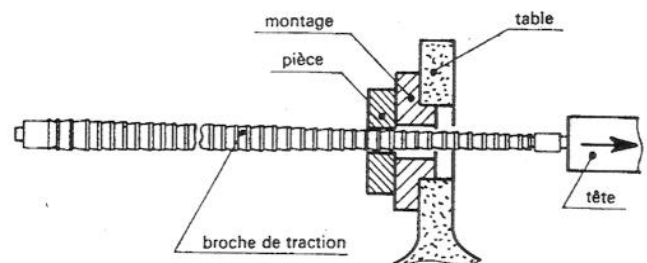
Figure 7.55

L'usinage d'une broche. Chaque dent est décalée de la précédente d'une quantité égale à l'épaisseur du copeau.

L'opération de brochage s'effectue sur une machine à brocher (figure 7.56) où la pièce s'appuie sur la table alors que le coulisseau pousse ou tire la broche qui usine la pièce.



(a)

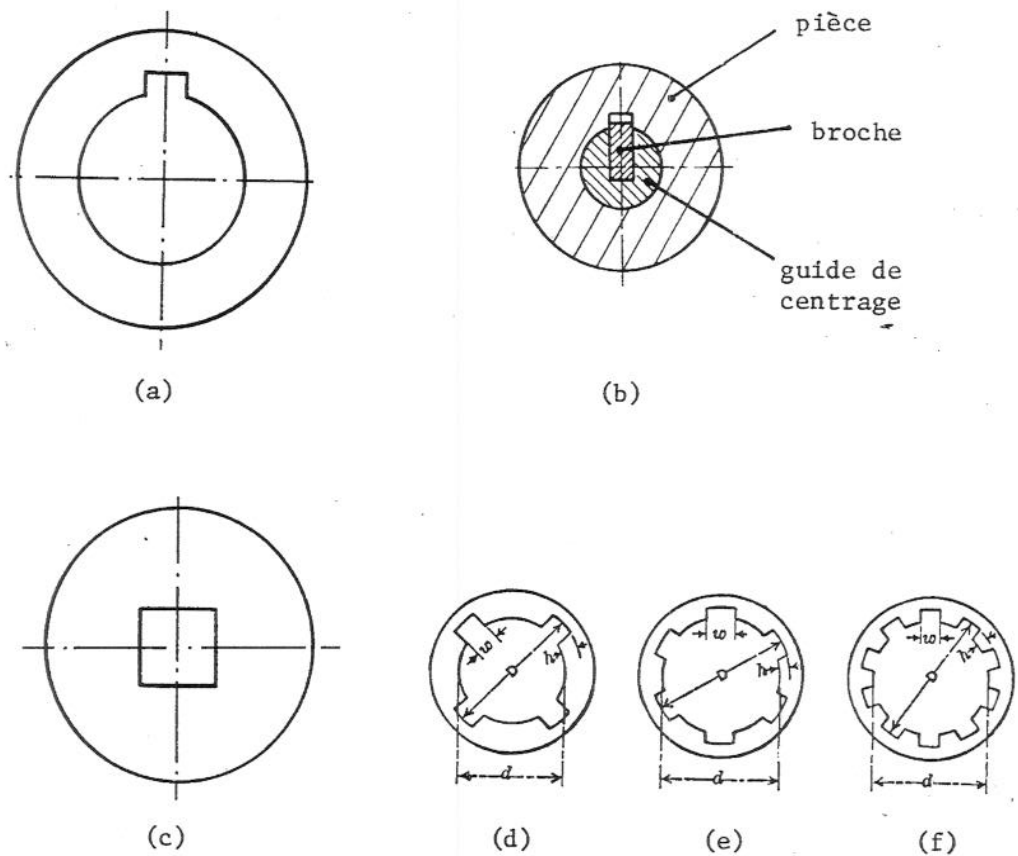


(b)

Figure 7.56: Principe des machines à brocher. La broche est (a) poussée ou (b) tirée à travers la pièce.



Le coût des broches étant élevé le brochage ne s'applique économiquement qu'aux moyennes et grandes séries. Toutefois, pour des profils courants (exemple: rainures de clavetage, cannelures, carré d'entraînement), le brochage de pièces unitaires est rentable à cause de broches standards disponibles. Des profils courants obtenus par brochage sont montrés à la figure 7.57.



**Figure 7.57:** Profils courants obtenus par brochage.

- (a) Chemin de clé. La rainure est brochée une fois l'alésage terminé - (b) Un guide de centrage guide la broche dans l'alésage.
- (c) Carré d'entraînement. Un trou d'ajour doit d'abord être percé afin de pouvoir introduire l'extrémité de la broche.
- (d), (e), (f) Trois profils de cannelures brochées à partir de l'alésage.

Les tolérances dimensionnelles obtenues par brochage sont de qualité 6 à 9. Le brochage n'est applicable qu'aux profils:

- pouvant être préalablement ouverts (ajour)
- débouchants. La pièce ne doit pas gêner la course de la broche.

## 7.4 Travail par abrasion

### 7.4.a) Le meulage et la rectification

Dans l'industrie, la rectification est très répandue car elle offre la possibilité de réaliser, à des coûts raisonnables, d'excellents états de surfaces ( $Ra \approx 0.2 \mu m$ ) et d'étroites tolérances de forme et de cote (qualité de 5 à 8).

#### Principe de la rectification

L'usinage par abrasion en rectification consiste à enlever le métal sous forme de microcopeaux. Ces microcopeaux sont créés par une multitude d'outils très durs appelés abrasifs regroupés entre eux par un agglomérant en forme de meule.

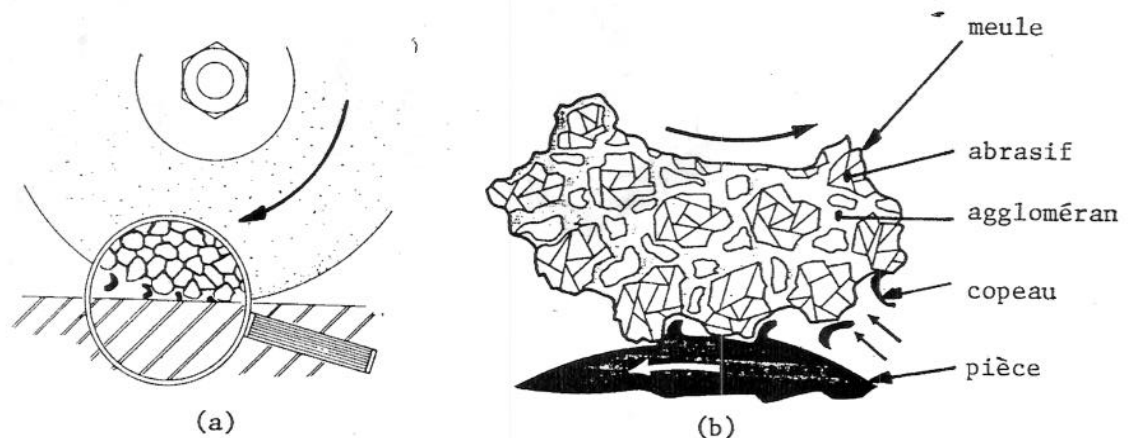


Figure 7.58: (a) La meule tourne et vient griffer la surface avec ses abrasifs.  
(b) Chaque arête des abrasifs soulève un microcopeau.

La meule contient de nombreux abrasifs qui viennent griffer la surface de la pièce. C'est ces multitudes éraflures qui donnent l'excellent état de surface. Les abrasifs présentent les caractéristiques suivantes:

- ils sont plus durs que le métal à rectifier;
- globalement, ils sont assez robustes pour résister aux efforts de coupe;
- ils sont également friables de telle façon que les arêtes émoussées sont automatiquement remplacées par de nouvelles arêtes vives.

La vitesse de coupe est très élevée, elle peut varier de 2000 à 7000 m/min à la périphérie de la meule. C'est l'agglomérant qui fixe la vitesse critique, car le grand danger d'une meule et son risque d'éclatement à cause des forces centrifuges internes. Ne jamais faire fonctionner une meule sans protection à éclats.

La figure 7.59 montre les deux principaux principes d'usinage par abrasion appelés rectifications plane et cylindrique.

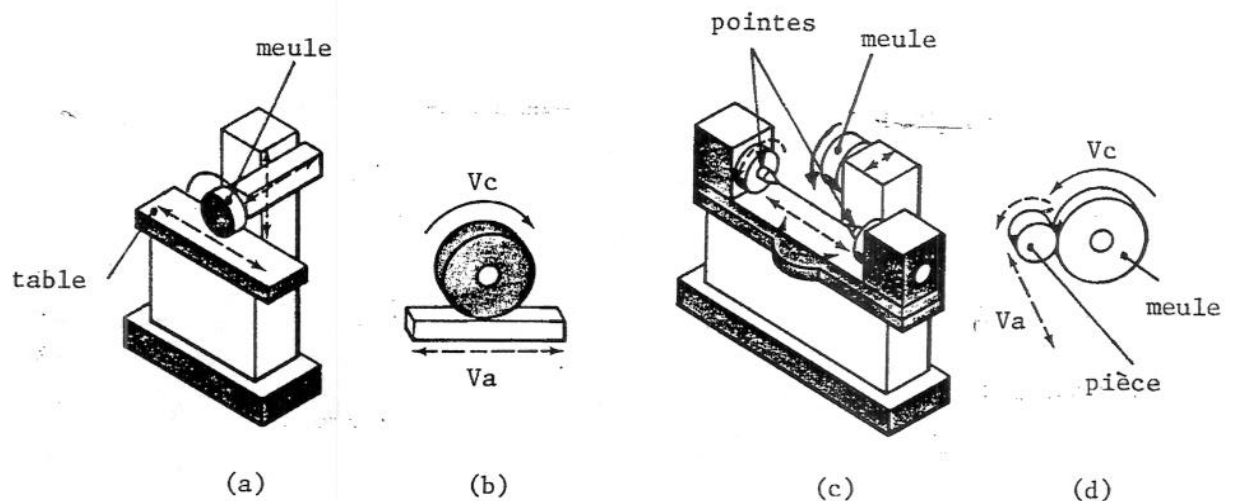


Figure 7.59 (a) - (b) - La rectification plane. La meule tourne et impose la vitesse de coupe ( $V_c$ ). La pièce fixée sur la table va et vient sous la meule. La vitesse d'avance ( $V_a$ ) peut être imposée à la pièce ou à la meule.

La rectification cylindrique

- (c) - La pièce, installée entre pointes, tourne lentement et va et vient devant la meule qui tourne ( $V_c$ ).
- (d) - La meule rectifie une forme circulaire.

La section suivante va présenter les différents types d'abrasifs et d'agglomérants commercialisés.

### Les types d'abrasifs

Les abrasifs peuvent être divisés en deux classes: les abrasifs naturels et les abrasifs artificiels.

Les abrasifs naturels, tels que l'emerî, le quartz, le corindon étaient couramment utilisés au début du vingtième siècle. Le problème était de se procurer ces matériaux à l'état pur. Le corindon est extrait en Grèce.

Les abrasifs artificiels ont subi un grand essor de nos jours à cause du contrôle possible de la taille, la forme et la pureté des grains. Trois matériaux sont utilisés comme abrasifs artificiels:

- l'oxyde d'aluminium,  $Al_2 O_3$ , représente 75% des meules commercialisées, sa dureté et sa friabilité augmentent avec sa pureté. L'oxyde d'aluminium le plus pur, de couleur blanche, est utilisé dans la rectification des aciers les plus durs et des aciers rapides des outils de coupe.
- le carbure de silicium est plutôt utilisé pour la rectification des roches, du marbre, des céramiques et des fontes.
- le carbure de bore, plus dur que le carbure de silicium, a des propriétés mécaniques très proches de celles des diamants. Très peu utilisé dans les meules, il est inclus dans les agglomérés devant résister à l'usure (exemple: bec de projection au sable).

Quel que soit le type d'abrasif, la taille des grains est un critère de choix très important dépendant des applications. Les meules d'ébauche ont un gros grain tandis que les meules finition ont un grain très fin. Un numéro est choisi pour désigner la taille des grains: 10, gros grain - 50, grain moyen - 100, grain fin - 200, grain très fin et 500 poudre.

### Les agglomérants

Les agglomérants ou liants ont pour fonction de retenir les grains d'abrasifs ensemble en forme de meule. Ce sont les agglomérants qui dictent la vitesse circonférentielle maximale de la meule. Ils sont soit :

- vitrifiés. La vitrification est beaucoup utilisée dans la fabrication des meules. Le liant argileux est d'abord fondu pour former une pellicule vitreuse autour des grains lors du refroidissement. Ce liant permet une vitesse linéaire de 2000 m/min.
- résineux. Des résines synthétiques forment l'agglomérant qui permet des vitesses linéaires de 3000 à 7000 m/min.
- caoutchouteux. Ce type de liant, utilisé pour les disques-scie (cut-off wheel) permet d'obtenir les meilleurs finis de surface à cause de sa flexibilité. D'autre part la meule est moins fragile aux chocs.

### Les machines-outils et leur possibilités

#### La rectifieuse plane

La rectifieuse plane rectifie les surfaces planes. L'axe de la meule est aussi bien horizontal (figure 7.60.a) que vertical. Le plus souvent, la meule ne fait que tourner alors que la pièce va et vient sous la meule. La figure 7.60.a montre une rectifieuse plane conventionnelle, ces machines sont semi-automatiques. Les mouvements de la table sont commandés hydrauliquement. La commande numérique n'est guère appropriée à de tels mouvements simples. Les figures 7.60 b, c et d représentent trois modes de rectification planes que peut recevoir la machine-outil.

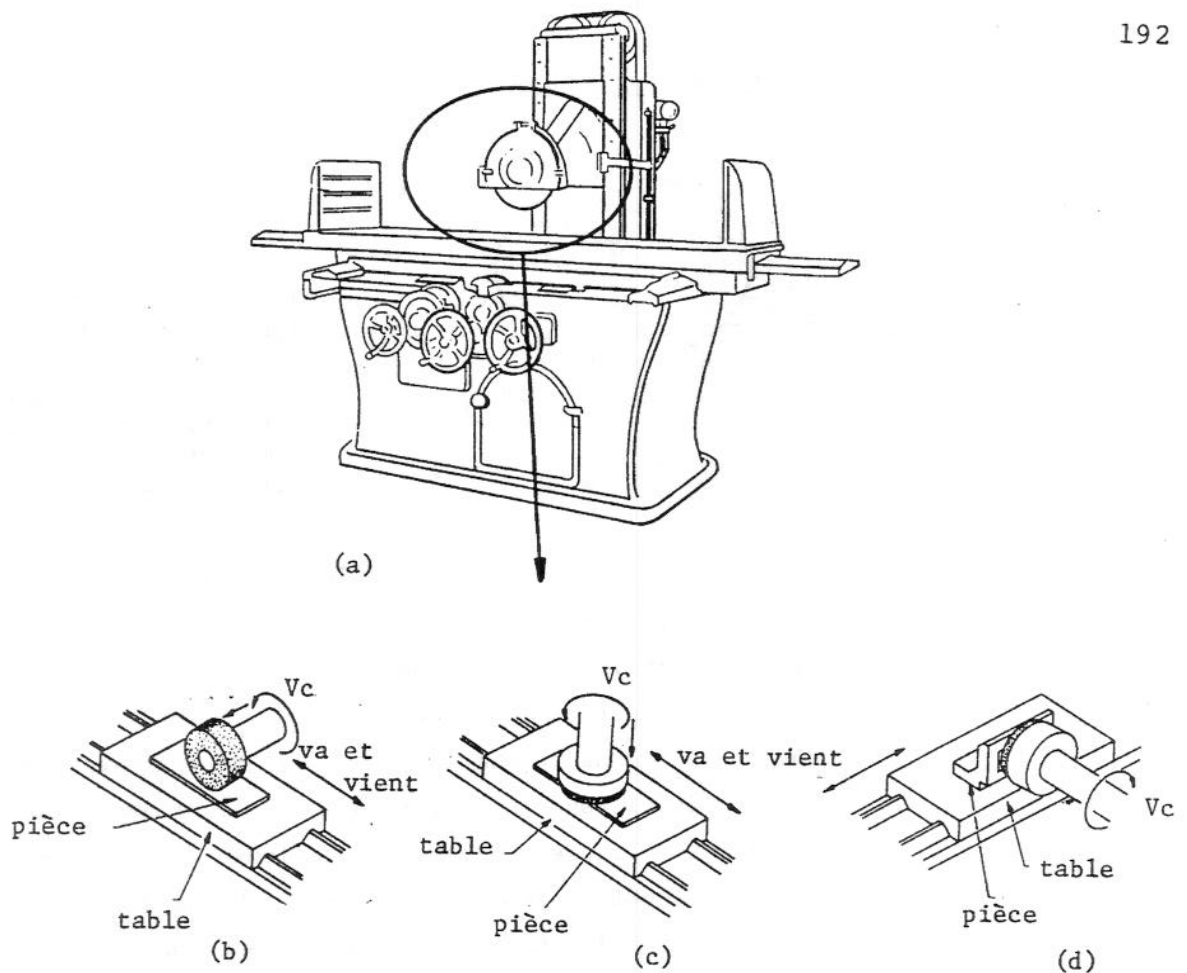


Figure 7.60 (a) La rectifieuse plane  
(b)(c) (d) Trois modes de rectification plane

Lorsqu'un grand nombre de pièces identiques est à rectifier la rectifieuse plane peut s'équiper pour travailler par lots. Plusieurs pièces sont rectifiées comme une grande surface. La figure 7.61 montre trois dispositions possibles de ce genre de rectification. Toutes les pièces du lot auront la même cote.

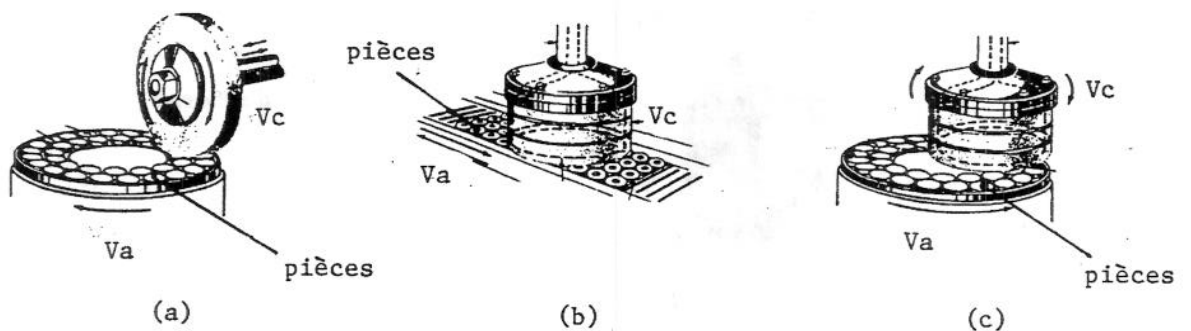
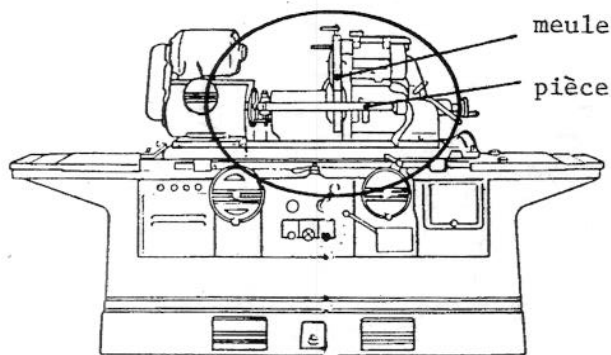


Figure 7.61: Rectification plane par lots. La forme de la meule ou le mouvement de la table peuvent changer. (b) - (c) une meule boisseau est utilisée.

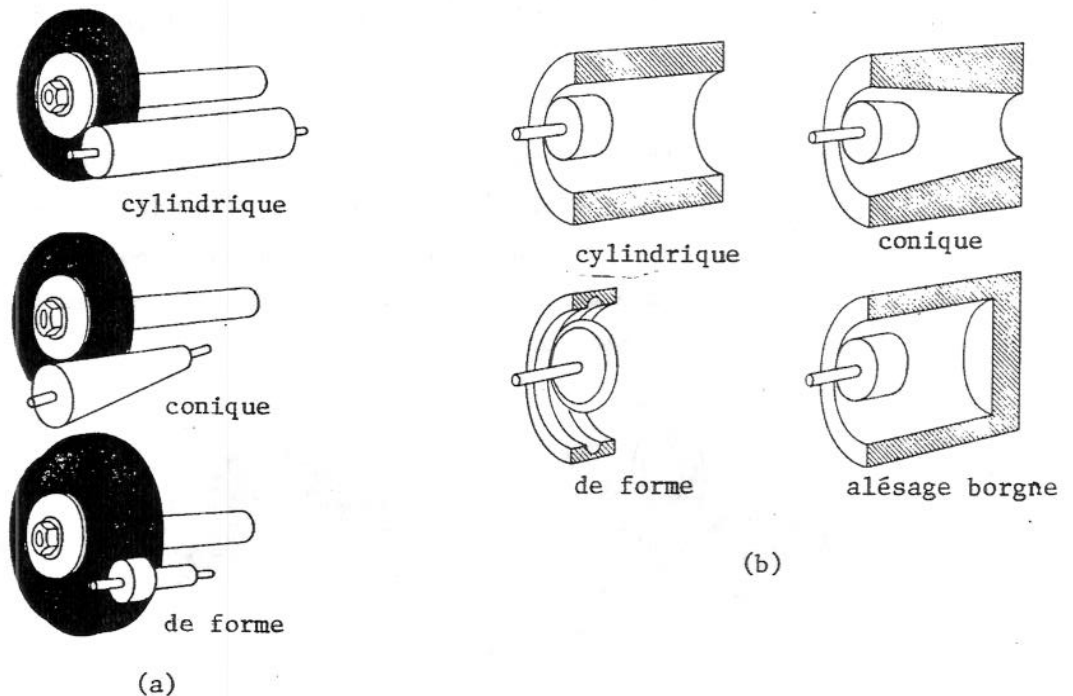
# La rectification cylindrique



**Figure 7.62:** Comme décrit à la figure 7.59.c, la meule tourne à sa vitesse requise alors que la pièce tourne lentement en allant et venant devant la meule. Des formes cylindriques d'excellente cylindricité sont ainsi obtenues.

Pour s'assurer une excellente cylindricité, il est conseillé de positionner la pièce de révolution entre pointes car elle conservera ainsi son axe tout en tournant. Au contraire, si la pièce est en forme de cuvette, elle peut être montée sur une table tournante semblable à celle des figures 7.61.a et c.

Les travaux de rectification cylindrique peuvent être extérieurs (figure 7.63.a) ou intérieurs (figure 7.63.b). Une meule appropriée est disponible pour chacun de ces travaux; remarquer la petite taille des meules pour les rectifications intérieures.



**Figure 7.63** (a) Travaux de rectification extérieure  
(b) Travaux de rectification intérieure



### La rectification cylindrique centerless

Le principe de la rectification cylindrique centerless est schématisé à la figure 7.64. La pièce n'est pas maintenue entre ces deux points de centre comme à la figure 7.62. Elle s'appuie sur une butée étroite positionnée entre les deux roues.

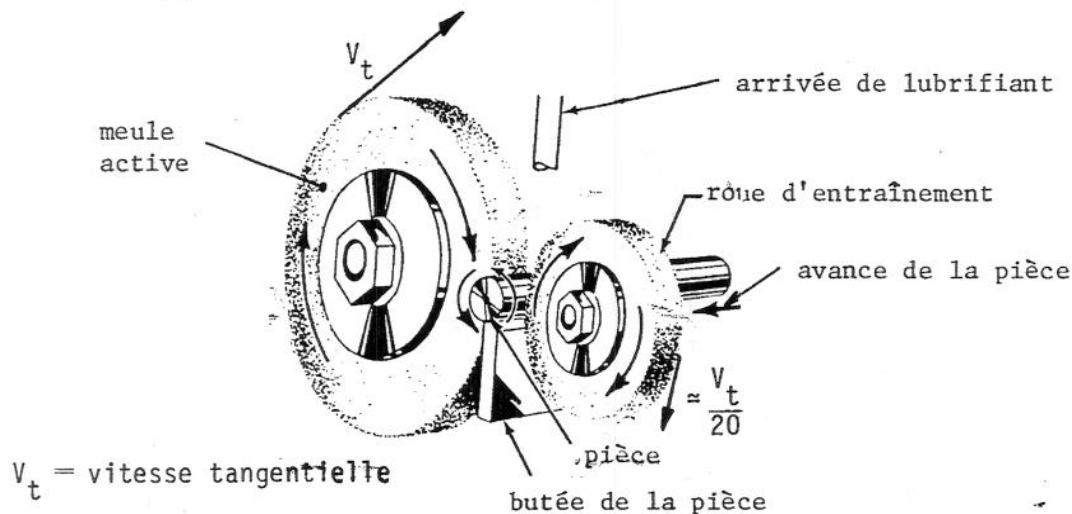


Figure 7.64: Principe de la rectification cylindrique centerless. La pièce avance entre la meule et la roue d'entraînement.

La plus grande roue est la meule active qui usine la pièce en tournant plutôt rapidement. La plus petite roue tourne dans le même sens que la première mais plus lentement. Cette roue appelée roue d'entraînement fait tourner la pièce à vitesse constante en plus de lui donner un deuxième appui. La roue d'entraînement fabriquée de liant caoutchouteux, n'usine pas la pièce. La pièce n'a plus qu'à avancer entre les deux roues pour être rectifiée sur toute sa longueur.

La rectification cylindrique centerless donne d'excellents résultats de cylindricité. Ce principe est surtout intéressant en grande production de pièces cylindriques. Comme le montre la figure 7.65, les pièces sont amenées dans une gouttière l'une à la suite de l'autre. L'avance des pièces entre les deux roues est automatique grâce à la faible inclinaison de la roue d'entraînement.

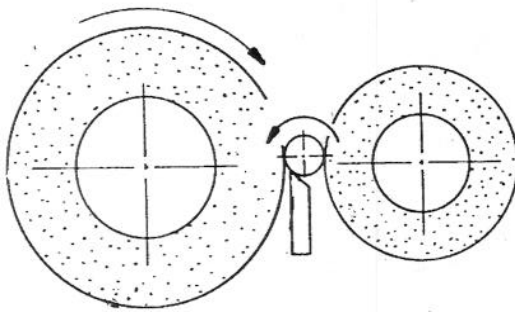
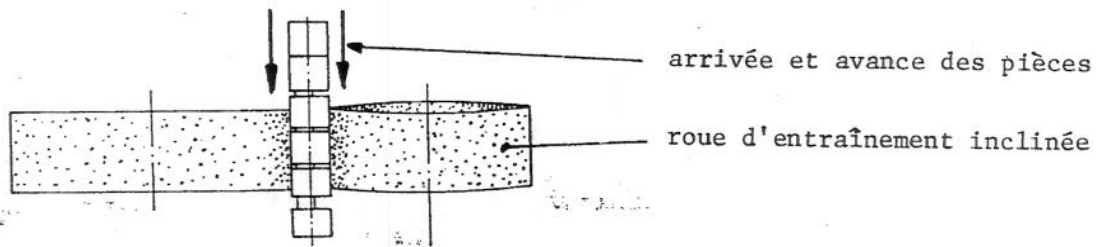


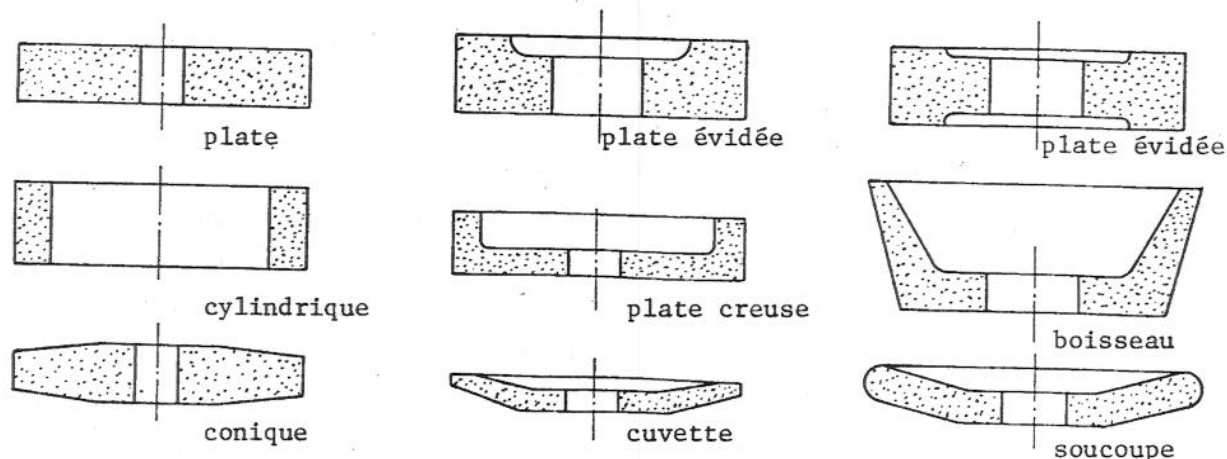
Figure 7.65: La rectification cylindrique centerless employée en production. Les pièces de révolution circulant entre les deux roues. L'avance est imposée par l'inclinaison de la roue d'entraînement.

### Les meules

Les meules de rectification sont répertoriées d'après leurs caractéristiques constitutantes et leur forme. Les caractéristiques identifiées sont les suivantes:

- le type d'abrasif (oxyde d'aluminium ou carbure de silicium ...)
- la taille du grain abrasif (10, gros — 600, fin)
- le grade (indice indiquant la résistance mécanique de l'agglomérant (A, mou — Z, dur)
- la structure (la répartition et la densité des grains abrasifs à l'intérieur de la meule: indice de 1 à 12)
- le type d'agglomérant et son procédé d'obtention (l'indice est une lettre simple ou double).

Dépendant des formes à obtenir, plusieurs géométries de meules sont disponibles. Quelques formes usuelles sont données à la figure 7.66.



**Figure 7.66:** Les géométries de meules standards. La meule boisseau est autant utilisée pour surfacer que la meule plate (voir les figures 7.61.b et c).

#### 7.4.b) Le rodage

Le rodage est un procédé abrasif de précision qui élimine une partie des défauts de troisième et quatrième ordre de rugosité: traces d'outil, arrachement de matière, ... L'usinage qui précède le rodage doit être de qualité, sans défauts majeurs (exemple: rectification). Très peu de matière est retirée lors du rodage, la cote dimensionnelle n'est quasiment pas affectée (maxi = 1/10 000 po). Les finis de surface sont des plus excellents. ( $R_a$  mini = 0.1  $\mu$ m).

Le rodage accroît la durée de vie à l'usure:

- des surfaces de frottement;
- des joints d'étanchéité devant frotter sur les surfaces rodées.

Les agents abrasifs utilisés en rodage sont les mêmes que ceux présentés pour la rectification. Un rodage fin exige un abrasif en poudre: grains 400 à 600. Suivant le procédé de rodage choisi, l'abrasif peut se présenter comme suit:

- en poudre abrasive mélangée avec le l'eau (pour le rodage du verre) ou bien de l'huile ou de la graisse (pour le rodage des métaux). Cette poudre mélangée est utilisée pour le rodage au rodoir (lapping).
- en poudre abrasive mélangée à un agglomérant pour former des pierres solides de différentes formes. Ce principe de rodage est aussi appelé pierrage (honing).

Le rodage peut s'appliquer à la main pour des pièces unitaires ou bien à l'aide de machines conçues spécialement à cette fin. La figure 7.67 montre un principe de rodage de bagues employé sur machine. Toutes les surfaces baignent dans la poudre abrasive huilée. La base circulaire tourne. Une pièce supérieure fixe (non montrée sur la figure) appuie les bagues sur la base tournante. Les bagues tournent également sur elles-mêmes.

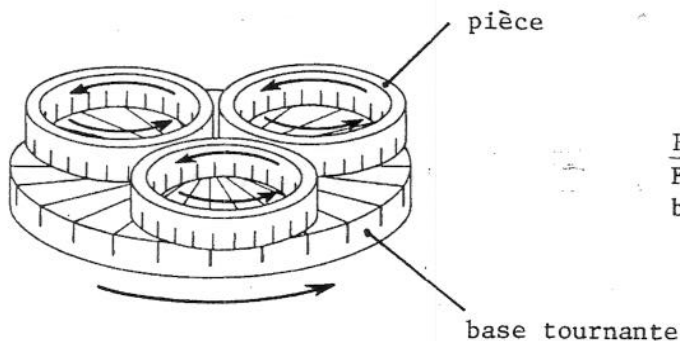


Figure 7.67

Principe du rodage mécanisé de bagues.

#### 7.4.c) Le polissage

Le polissage est un procédé abrasif qui fournit de très belles apparences de fini de surface. Très semblable au rodage quant au principe, il est généralement pratiqué sur la machine-outil même, exemple: le polissage au tour. Une bande de tissus imbibée de poudre abrasive fine et tendue sur la surface de la pièce qui tourne très vite, approximativement deux fois la vitesse de coupe. Le polissage manuel est un procédé beaucoup plus long et très rare en production.

## 7.5 Les procédés physico-chimiques

### 7.5.a) L'usinage par électroérosion (electrical discharge machining, EDM)

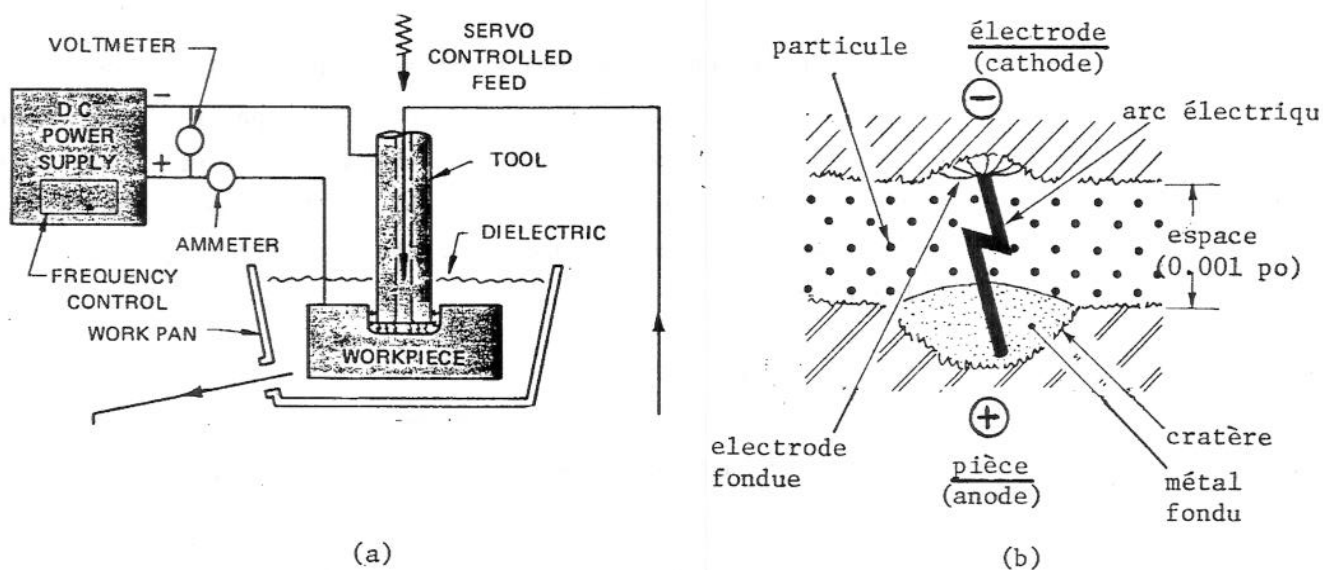


Figure 7.68: Principe de l'usinage par électroérosion

- (a) - L'électrode-outil entre dans la pièce en la désintégrant.
- (b) - Une multitude d'arcs entre l'électrode et la pièce créent une fusion et une érosion du métal de la pièce anode.

#### Principe d'usinage par électroérosion

La pièce (l'anode) et l'électrode-outil (cathode), non en contact, baignent dans un bain où circule un liquide diélectrique (non conducteur). Lorsque l'énergie électrique appliquée au bornes des deux pièces est suffisante, le diélectrique devient gazeux et favorise la formation de brefs et puissants arcs de courant. La chaleur générée crée une fusion partielle de la pièce. De petites particules de métal se détachent et sont évacuées par le diélectrique circulant.

Ces arcs électriques se produisent 20 000 à 30 000 fois par seconde. Cette fréquence dépend de l'espace (gap) entre les deux pièces ainsi que du courant que peut fournir le système d'alimentation électrique.

La circulation du fluide diélectrique permet d'évacuer les particules de matériau et de refroidir les surfaces de la pièce et de l'électrode.

L'électrode-outil avance dans la pièce au rythme de l'usinage afin de garder un espace libre constant ( $\text{gap} \approx 1/1000^{\text{e}} \text{ po}$ ). Il ne doit jamais y avoir contact pièce-outil.

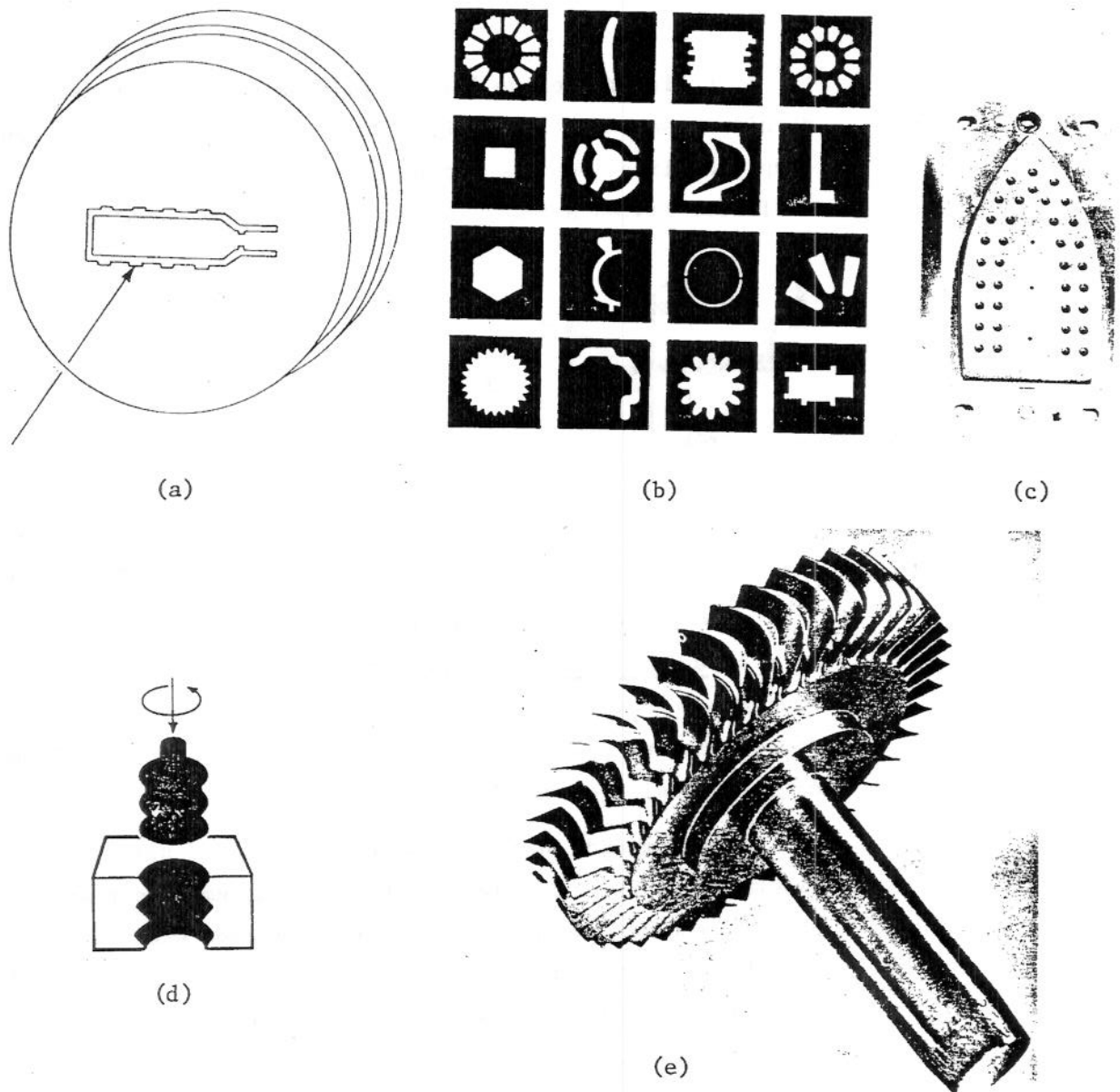
L'électrode est également soumise à l'électroérosion, son usure est difficile à contrôler. Le rapport d'usure moyen pièce-électrode est 3 avec des électrodes en cuivre et en laiton et 10 avec des électrodes en graphite. L'alimentation électrique avec inversion fréquente de polarité réduit fortement l'usure de l'électrode.

#### Applications

L'électrode-outil a la forme de l'empreinte à obtenir et se déplace dans la pièce. L'électroérosion est pratiquée dans le cas où:

- la quantité de matière à retirer est faible car les vitesses d'avance de l'électrode sont faibles. Débit maximum de matière à l'ébauche,  $5 \text{ cm}^3/\text{min}$  et à la finition  $0.05 \text{ cm}^3/\text{min}$ .
- les formes ou les profils à réaliser sont complexes. Ces formes doivent être bien sûr des "formes démontables" à moins que l'électrode tourne dans la pièce comme à la figure 7.69.d.
- les matériaux à éroder sont conducteurs.

Les machines à électroérosion sont de prix raisonnables par rapport aux machines-outils tour et fraiseuse. La figure 7.69 montre des formes d'usinage où l'électroérosion (EDM) devient très intéressante. Malgré que les temps d'usinage soient longs, ces usinages demeurent toujours rentables par rapport à des procédés de coupe tel que le fraisage.



**Figure 7.69:** Profils complexes obtenus par électroérosion à électrode

- (a) Des matrices ou des filières d'extrusion sont obtenues
- (b) Formes fermées. L'électroérosion à fil permet également d'obtenir ces formes fermées
- (c) Usinages seulement possible à l'électrode.
- (d) L'électrode entre dans la pièce et décrit un cercle pour usiner cette forme "non démontable".
- (e) Turbine de titane. L'électrode avance entre les pales à la vitesse de 6 mm/min. Cet usinage serait très coûteux sur fraiseuse qui doit être commandée numériquement.

L'électroérosion à fil a pris beaucoup d'expansion ces dernières années. Le procédé est simple et s'adapte à beaucoup d'applications. La figure 7.70 montre le principe de l'électroérosion à fil; l'électrode-outil est remplacée par

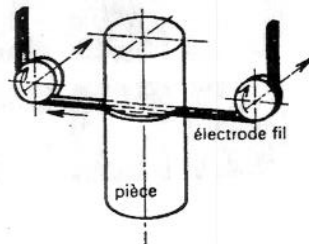


Figure 7.70: Principe de l'électroérosion à fil

un fil de cuivre qui circule lentement. L'électrode est ainsi régénérée. Ce fil de 0.12 mm usine une fente 0.2 mm de largeur.

Ce procédé permet de réaliser les profils de matrices d'extrusion en acier trempé tels que montrés à la figure 7.69.b. Un trou est préalablement perçé pour introduire le fil électrode. Les finis de surface qui dépendent de l'avance sont bons,  $R_a \approx 3.2 \mu m$  tout comme un fraisage normal.

La commande numérique s'adapte bien aux usinages par électroérosion à fil. La pièce peut être simplement déplacée dans le plan x y (deux axes) pour obtenir les formes droites de la figure 7.69.b; ou bien l'inclinaison du fil peut être aussi contrôlée (troisième et quatrième axes) pour réaliser par exemple la pièce de la figure 7.71.

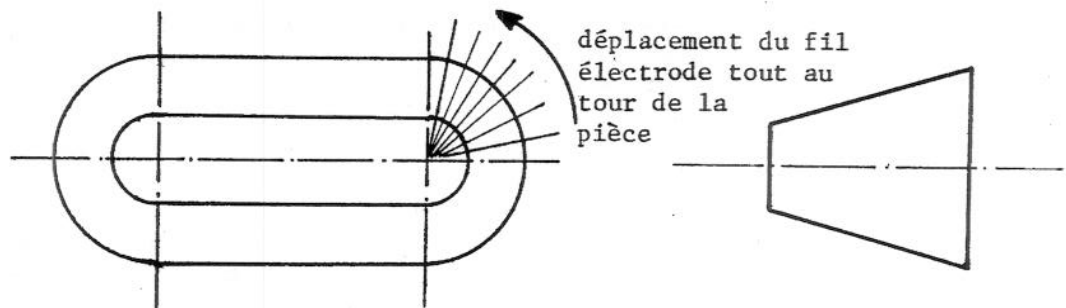


Figure 7.71

Figure 7.71: Pièce à surfaces courbes à rayon variable réalisable par électroérosion à fil à commande numérique.



### 7.5.b) L'usinage électrochimique (électrochemical machining, ECM)

Dans l'usinage électrochimique, une électrode-outil en graphite pénètre dans la pièce comme dans l'usinage par électro-érosion, seul le principe d'enlèvement de matière diffère. Un courant électrique continu passe entre les deux électrodes (pièce-anode et outil-cathode) baignant dans un électrolyte. (chlorure de sodium ou nitrate de sodium). Le métal enlevé à l'anode est évacué par l'électrolyte qui circule sous pression.

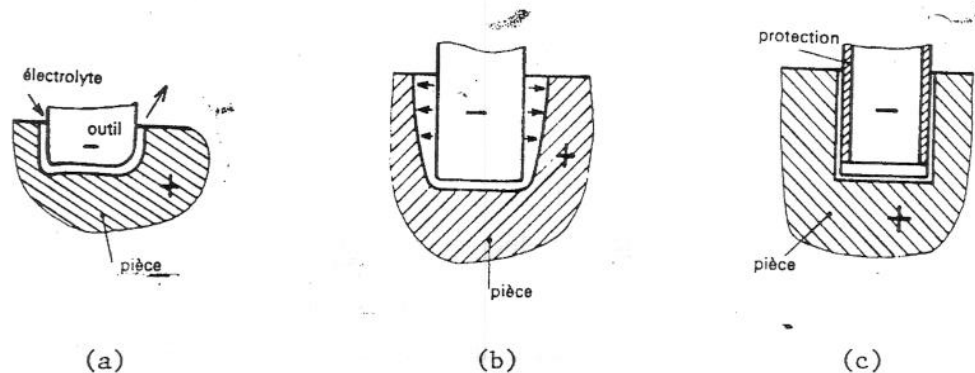


Figure 7.72: L'usinage électrochimique

- (a) Un courant continu appliqué entre la pièce et l'électrode accélère la corrosion de la pièce.
- (b) - (c) Les électrodes isolées par un vernis permettent d'obtenir des diamètres cylindriques non évasés.

L'électrode à la forme de l'empreinte à réaliser. Du fait que l'attaque chimique soit continue, l'électrode doit parfois être recouverte de vernis ou de plastique pour respecter le profil désiré (figure 7.72.b et c).

Ce procédé d'usinage présente les avantages suivants:

- pas d'échauffement du métal
- usinage de matériaux durs ou réfractaires et bien sûr conducteurs.
- usure nulle de l'électrode
- états de surface bons,  $R_a \approx 3.2 \mu m$
- débit de matière cinq à dix fois celui de l'électro-érosion à électrode

Bien que ce procédé n'offre pas la souplesse de l'électroérosion à fil et que la réaction soit difficile à contrôler, il convient très bien au taillage interne de feuilles. La figure 7.73 montre une feuille d'aluminium de 2 par 1.5 mètres usinée électrochimiquement.

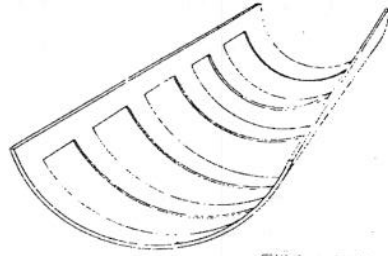
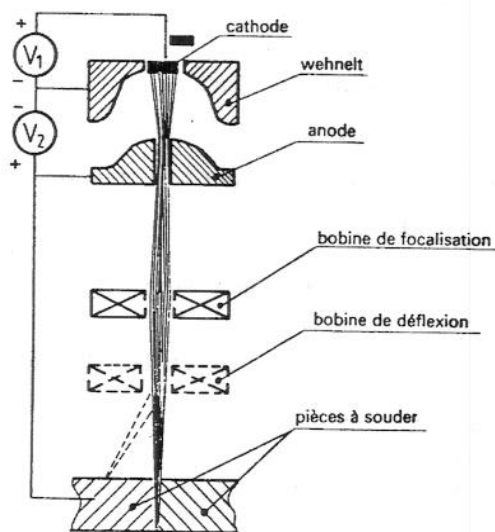


Figure 7.73: Feuille de revêtement d'avion en aluminium usinée électrochimiquement. Dimensions de la feuille: 2 X 1.5 m.

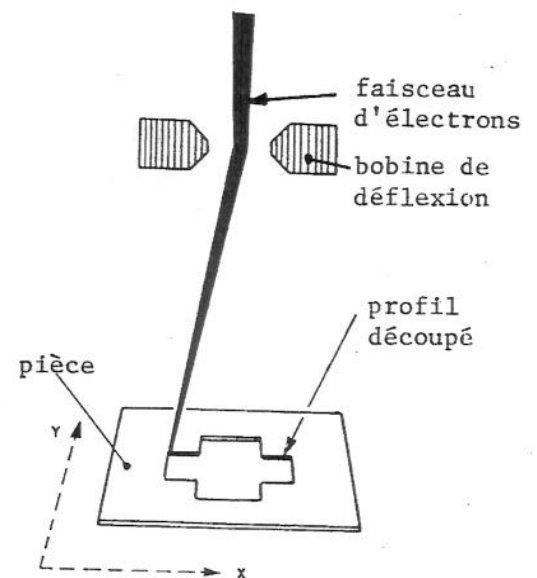
#### 7.5.c) Le laser à découper ou à souder

Les applications du laser, en cours de développement, sont encore réduites malgré que beaucoup de progrès aient été réalisés en soudage. Le découpage basé sur le même principe demande une plus forte intensité que le soudage.

Ce procédé réalisé sous vide utilise un faisceau d'électrons dont l'impact sur le métal provoque la fusion. Le principe est schématisé à la figure 7.74.a. L'émetteur est un système



(a)



(b)

Figure 7.74 (a) Principe du bombardement électronique  
(b) Découpage par laser.

anode - cathode sous vide porté à très haut potentiel. Un effet thermoionique se crée à la surface de la cathode chaude. La coupole, polarisée négativement, forme un champ d'électrons qui s'accélère jusqu'au passage de l'anode. Des lentilles magnétiques de focalisation et de déviation focalise et dirige respectivement le faisceau qui vient frapper la surface de la pièce à découper.

Bien que ce procédé puisse découper 200 mm d'acier, il demande une source puissante sous vide ainsi qu'une protection par blindage de plomb à cause des rayons X émis.

#### 7.5.d) Découpage à l'eau ou «water knife»

L'effet de découpage à l'eau est créé par un jet d'eau à haute vitesse (au moins deux fois la vitesse du son). L'eau est pressurisée à 440 MPa et dirigée à travers une base de 0,1 à 0,4 mm de diamètre.

Ce procédé présente des avantages par rapport aux procédés conventionnels car :

- il crée peu de perte de matière,
- il découpe sans chauffer le matériel et n'occasionne ainsi aucune déformation de la plaque ou de la feuille,
- il ne crée pas de poussière.

Le découpage à l'eau est utilisé pour plusieurs matériaux non métalliques : kevlar, epoxy, graphite, plastique renforcé, cuir. Des matériaux fragiles tel que le verre sont déconseillés car la violence du jet crée leur éclatement.

### 7.6 Les procédés d'usinage et les états de surface

Le chapitre # 2 qui traite les états de surface a fourni un tableau des plages de rugosité obtenues sur les surfaces brutes et usinées en fonction des procédés d'usinage et d'obtention de bruts, tableau 2.4. Ce tableau est une donnée importante quant au choix d'un procédé d'usinage car les dessins de définition des pièces spécifient des rugosités. Ce même tableau conclut ce chapitre sur les procédés d'usinage.



## CHAPITRE VIII

### L'ISOSTATISME

#### 8.1 Définition

Les conditions fonctionnelles des pièces mécaniques sont transcrites par la cotation du dessin de définition à partir de laquelle ces pièces sont à fabriquer. Pour cela, des montages d'usinage avec positionnements précis, stables et sans incertitude sont à concevoir.

Dans la fabrication en série continue ou renouvelable, les pièces sont démontées, remontées, bloquées très souvent, en fonction des difficultés d'usinage. Toutes ces reprises obligent à retrouver identiquement, d'une pièce à l'autre, le positionnement sur les machines-outils pour conserver la précision d'usinage dictée dans la cotation du dessin de définition.

Pour permettre d'assurer ces positionnements uniques des pièces sur les machines, le préparateur du bureau des méthodes fait appel à l'isostatisme.

L'isostatisme qui signifie même état statique est une théorie à maîtriser avant d'aborder la préparation d'un usinage unitaire ou de série. Il permet d'étudier le positionnement d'une pièce sur son poste de travail. Ce positionnement sera la synthèse de plusieurs facteurs, soit :

- la cotation dimensionnelle et de forme du dessin de définition
- la géométrie de la pièce
- la rigidité de la pièce
- les usinages déjà réalisés
- les usinages à réaliser
- le serrage de la pièce

Ce chapitre présente les bases fondamentales de l'isostatisme. Du fait de la particularité de chaque pièce et de chaque usinage, des conseils et suggestions généraux seront donnés au lieu d'un cheminement logique incluant les six facteurs précités.

## 8.2 Les degrés de liberté et les liaisons

Tout corps rigide libre dans l'espace, par exemple l'avion de la figure 8.1, a six mouvements possibles ou six degrés de liberté:

- trois translations suivant les trois axes orthogonaux menés à partir d'un point 0 solide au corps rigide
  - axe 0x, l'avance
  - axe 0y, la dérive
  - axe 0z, l'ascension
- trois rotations autour des trois mêmes axes
  - axe 0x, le roulis
  - axe 0y, le tangage
  - axe 0z, le lacet.

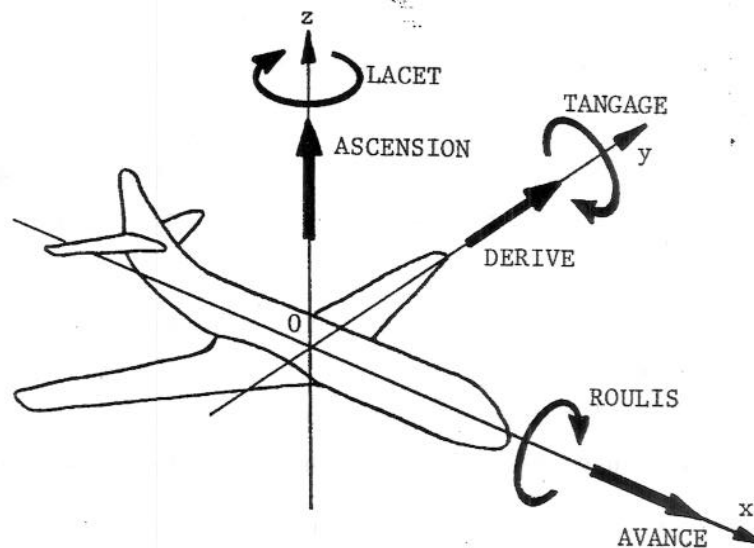
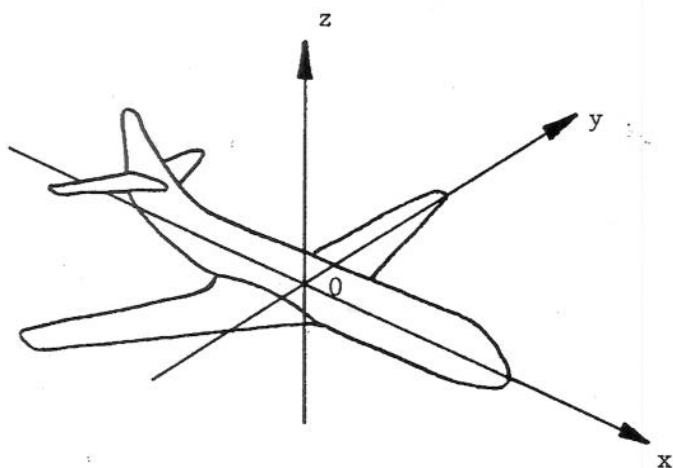


Figure 8.1: Les six degrés de liberté d'un corps dans l'espace rapportés à un avion.

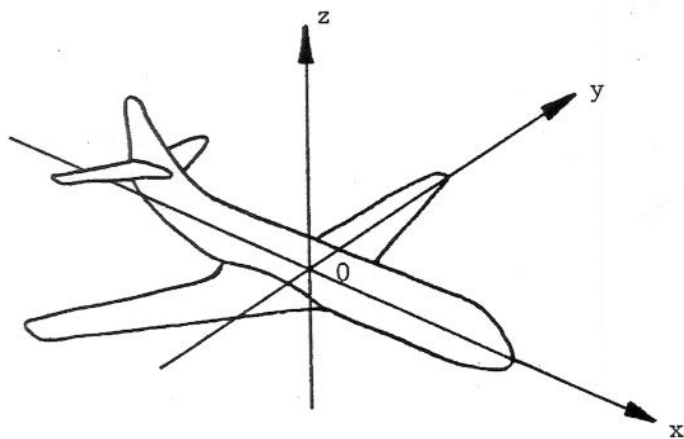
On appelle liaison tout contact ponctuel qui supprime un degré de liberté. Pour immobiliser totalement un corps rigide dans l'espace, il faudra donc six liaisons; mais attention, ces liaisons ne devront pas être disposées au hasard. L'isostatisme est la théorie qui permet de localiser judicieusement les liaisons afin que chacune des liaisons supprime un degré de liberté.

L'emplacement d'une liaison (contact ponctuel) est déterminé de manière à ce que le degré de liberté qu'elle empêche ne soit pas déjà interdit par d'autres contacts.

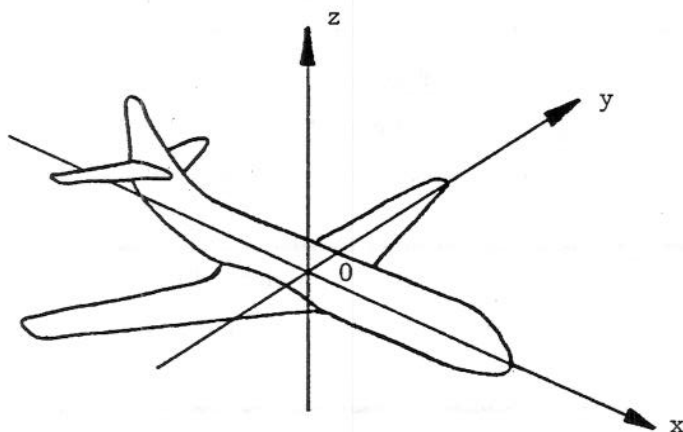
Exercice: L'exercice suivant consiste à poser graduellement les six liaisons nécessaires à immobiliser totalement l'avion de la figure 8.1. La séquence des degrés de liberté empêchés est dictée au long de l'exercice.



Immobiliser la translation en Z (ascension).  
Il reste 5 mouvements possibles.



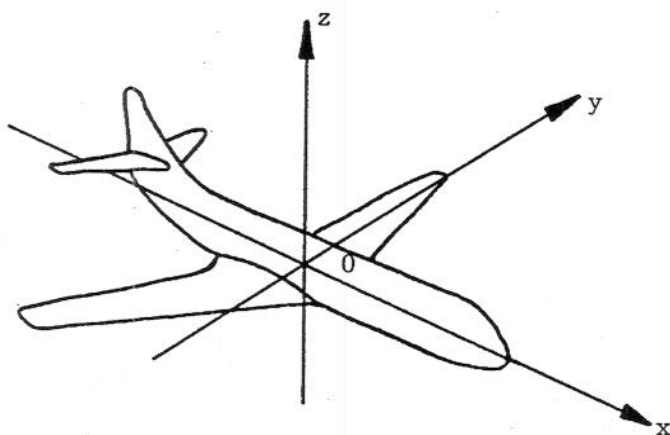
Immobiliser la rotation autour de y (tangage).  
Il demeure 4 mouvements possibles.



Immobiliser la rotation autour de x (roulis).

L'avion repose sur un plan (3 points)

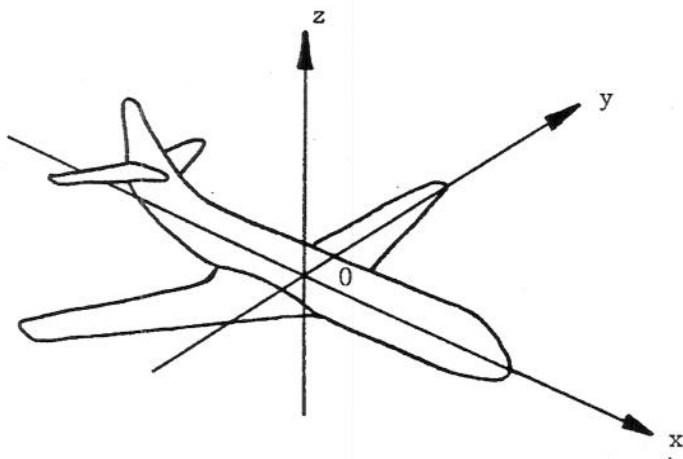
Trois mouvements possibles subsistent



Immobiliser la translation en x (avance)

Quels sont les mouvements possibles restants:

—  
—



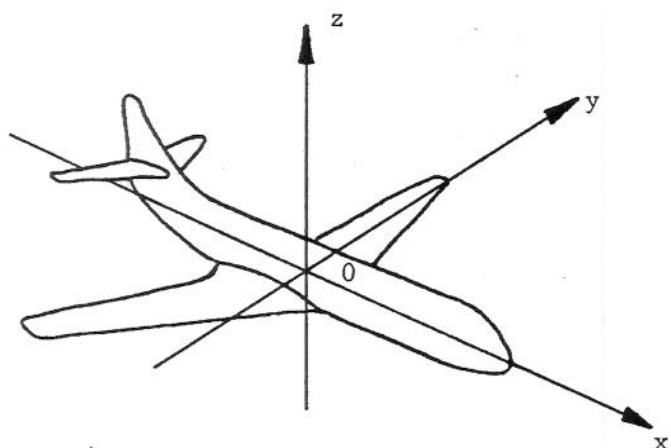
Immobiliser la rotation en Z (lacet)

L'avion repose sur un plan et s'appuie sur une ligne latérale

Un seul mouvement demeure:

—







Immobiliser totalement l'avion  
SIX DEGRES DE LIBERTE = SIX  
LIAISONS

IMMOBILISATION TOTALE

### 8.3 L'isostatisme de formes géométriques simples

#### 8.3.a) Symbolisation des liaisons

Pour débiter l'isostatisme appliqué nous allons adopter une symbolisation simple des liaisons. Le symbole de base (  ) sera normal à la surface de la pièce tandis que sa projection orthogonale sera représentée comme suit:  . La figure 8.2 montre l'exemple d'un appui plan nécessitant trois liaisons appliquées à une pièce prismatique.

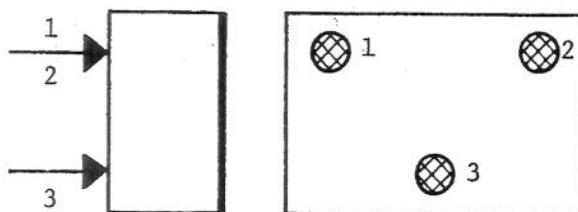


Figure 8.2: Symbolisation d'un appui plan suivant deux vues orthogonales.

Il n'y a aucune différence quant à la symbolisation des liaisons sur des projections vues ou cachées.

### 8.3.b) L'isostatisme d'un cylindre court

Un cylindre court est une pièce dont le rapport du diamètre par son épaisseur est supérieur à l'unité. L'unité est un ordre de grandeur et non une limite franche. Dépendant de la géométrie de la pièce possédant le cylindre, celui-ci peut aussi être considéré comme un cylindre court ou long si son diamètre est égal à son épaisseur.

Soit le cylindre court de la figure 8.3. L'axe  $y$  est l'axe du cylindre. Les axes  $x$  et  $z$ , orthogonaux et inscrits sur une surface plane extrême, sont concourants avec  $y$  au point 0.

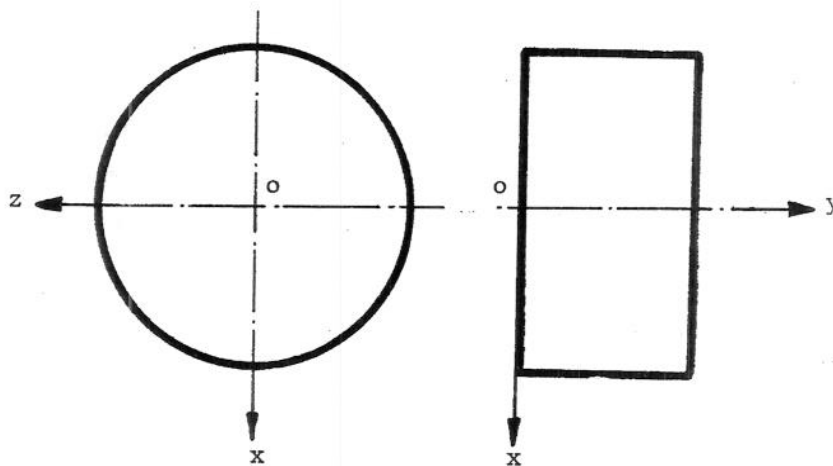
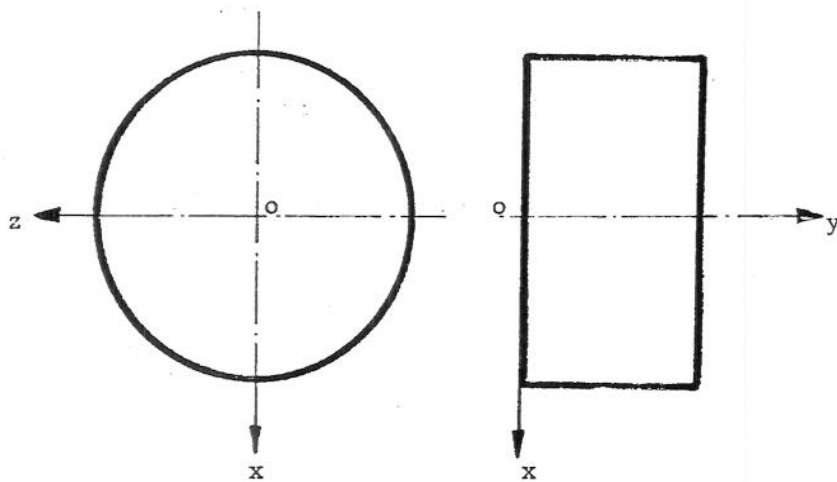


Figure 8.3:  
Un cylindre court  
avec son repère  
orthogonal.

L'isostatisme est la rationalisation des localisations des liaisons afin que chaque liaison supprime un degré de liberté. Dans le cas d'un cylindre court seul, l'isostatisme se présente comme suit:

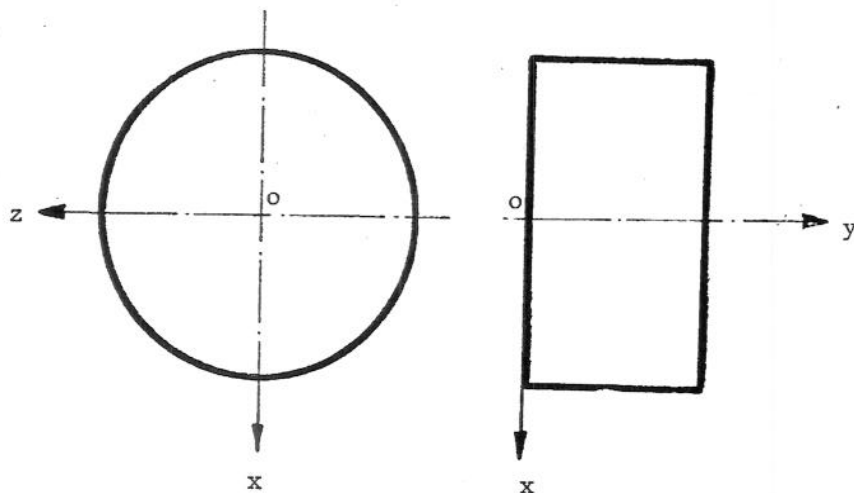
- 1- Prendre appui(s) sur la surface (plane ou courbe) offrant la meilleure stabilité au cylindre court. Cette surface est une des deux faces planes. L'appui sera sur un PLAN avec TROIS LIAISONS.



Indiquer 1' APPUI PLAN sur la surface plane inférieure et numéroté les liaisons par 1, 2 et 3.

Maintenant le cylindre court n'a que trois mouvements possibles: la rotation autour de y et les translations le long des axes x et z.

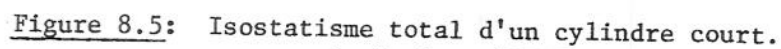
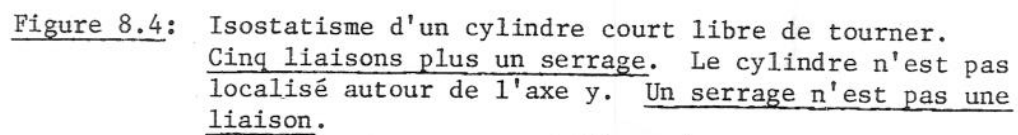
- 2- Prendre appui(s) sur la surface latérale courbe, perpendiculaire à la première surface choisie pour empêcher les deux translations possibles en x et z.



Indiquer les deux liaisons qui empêchent les translations en x et z. Ceci est un CENTRAGE COURT identifié par les liaisons 4 et 5.

Les deux liaisons 4 et 5 du centrage court sont à 90 degrés l'une par rapport à l'autre. Physiquement, cela équivaut à placer le cylindre court dans un vé court à 90 degrés.

- 3- Les cinq liaisons présentées ci-dessus ne laissent qu'un seul degré de liberté soit la rotation autour de l'axe y. Dépendant de l'usinage à réaliser et de la machine-outil choisie, ce dernier degré de liberté peut être conservé ou éliminé:
- Si le cylindre court est installé sur un tour pour usinage, ce sixième degré de liberté est libre car la pièce doit tourner, mais elle doit toutefois être bloquée. Ce blocage se fait en opposition aux appuis 4 et 5 tel que montré à la figure 8.4. Le serrage n'est pas une liaison car la pièce peut être serrée suivant n'importe quelle orientation possible autour de l'axe y.
  - Par contre si une immobilisation totale à une orientation donnée autour de y est désirée, une sixième liaison 6 est nécessaire, liaison perpendiculaire à une surface indexant la rotation du cylindre court. A la figure 8.5, une rainure permet d'indexer la position du cylindre autour de y. La liaison 6 qui peut être apposée sur l'une des deux faces de la rainure, immobilise isostatiquement le cylindre. La rainure pourrait être aussi remplacée par un trou désaxé.



- 1, 2, 3 - APPUI-PLAN  
4, 5 - CENTRAGE COURT  
6 - LOCATION (locating)

Le cylindre peut être bloqué à cette position, ce ne sera pas une nouvelle liaison.

### 8.3.c) L'isostatisme du cylindre long

Un cylindre long est une pièce dont le rapport de son diamètre par sa longueur est inférieur à l'unité. La remarque apportée pour le cylindre court est également valable pour le cylindre long: "l'unité est un ordre de grandeur et non une limite franche". La figure 8.6 montre un cylindre long où  $y$  est son axe.

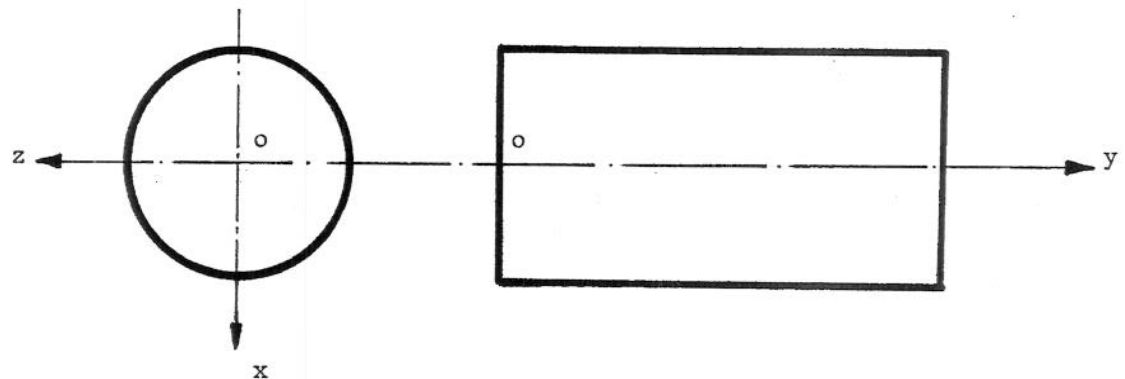
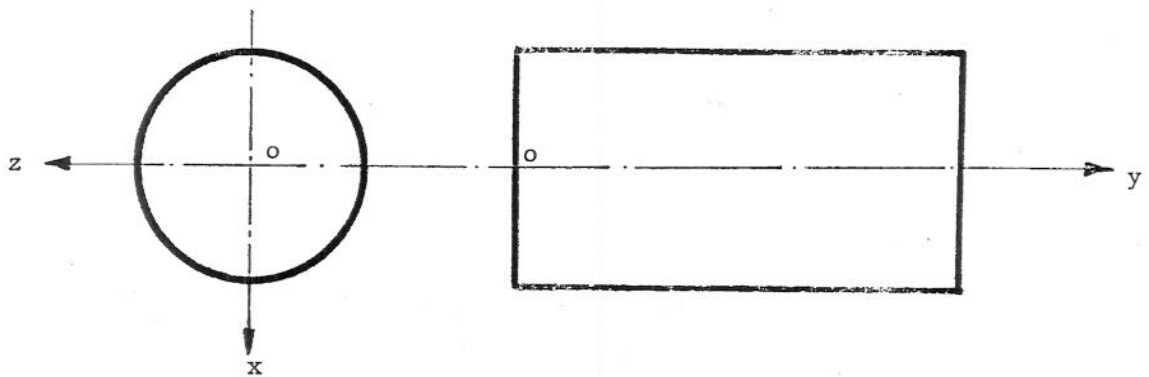


Figure 8.6: Un cylindre long avec son repère orthogonal  $x, y, z$ . Noter qu'un cylindre long peut aussi bien être un alésage.

Dans le cas d'un cylindre long seul, l'isostatisme se présente comme suit:

- 1- Prendre appui(s) sur la surface (plane ou courbe) offrant la meilleure stabilité au cylindre long. Cette surface est celle du cylindre; quatre liaisons équivalentes à deux vés éloignés assureront un CENTRAGE LONG. Indiquer sur le cylindre long ci-après, les quatre liaisons 1, 2, 3 et 4 qui assurent ce CENTRAGE LONG sur la surface du cylindre.



Le centrage long permet la localisation de l'axe  $y$  du cylindre. Il est évident que cette localisation sera meilleure si les appuis sont proches des extrémités du cylindre.

Le centrage long a éliminé quatre degrés de liberté.

Deux degrés de liberté demeurent. Par rapport à l'axe  $y$ , le cylindre peut encore tourner et glisser.

- 2- Un simple appui sur une des deux faces planes extrêmes élimine la translation suivant  $y$ . Ce type d'appui est appelé BUTÉE AXIALE. Indiquer la butée axiale 5 sur le cylindre long ci-dessus.

Cinq liaisons ont été posées, le cylindre peut encore tourner autour de  $y$ . Ce sixième degré de liberté peut être conservé ou éliminé:

- Si le cylindre long doit tourner pour être usiné, le sixième degré de liberté est conservé. Un blocage est nécessaire mais ce dernier n'est pas une liaison. La figure 8.7 montre ce repérage à cinq liaisons avec serrage. Noter que le serrage est localisé et orienté de façon à accroître le contact et de ce fait, la stabilité de cylindre sur ses liaisons 1, 2, 3, 4 et 5.

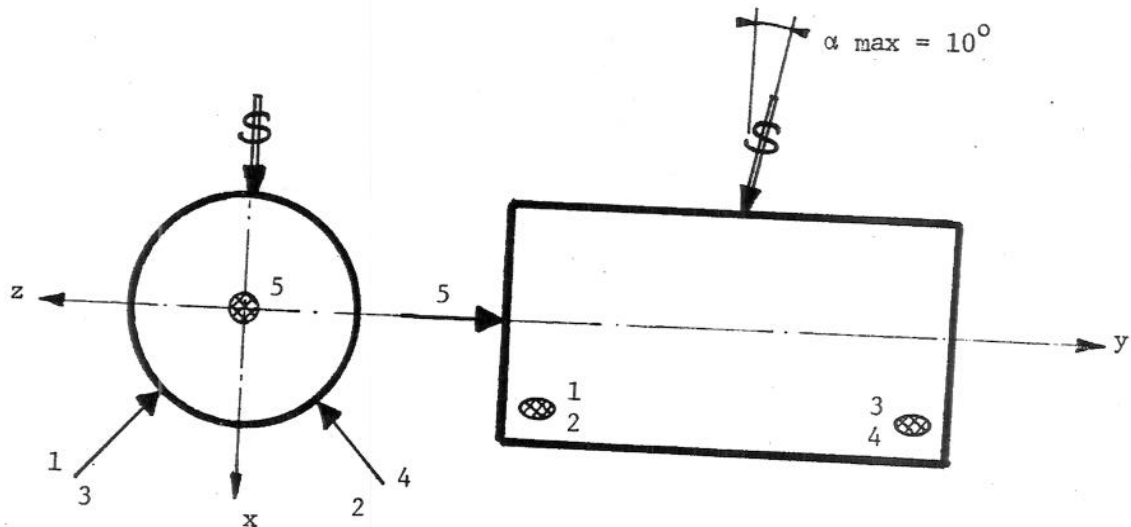


Figure 8.7: Isostatisme du cylindre long.

1, 2, 3, 4 - CENTRAGE LONG  
5 - BUTEE AXIALE

Le serrage n'est pas une liaison, il n'indexe pas la position du cylindre autour de l'axe y.

Le serrage a pour fonction d'assurer, durant l'usinage, les contacts entre la pièce et les liaisons posées.

Lors du choix des zones de serrage, les principes suivants doivent être respectés :

- les forces de serrage doivent assurer les contacts pièce/liaisons;
- les forces de serrage doivent s'exercer dans une zone aussi proche que possible des surfaces à usiner;
- les forces de serrage doivent être modérées et ne pas engendrer à la pièce des déformations supérieures à la moitié de l'intervalle de tolérance à respecter;
- les efforts de serrage ne doivent pas déformer la pièce aussi bien avant qu'après l'usinage.



- Si une immobilisation totale du cylindre long est requise, il faut créer une surface d'indexage sur le cylindre; une plaque soudée (figure 8.8) ou un trou radial peut recevoir la liaison location 6.

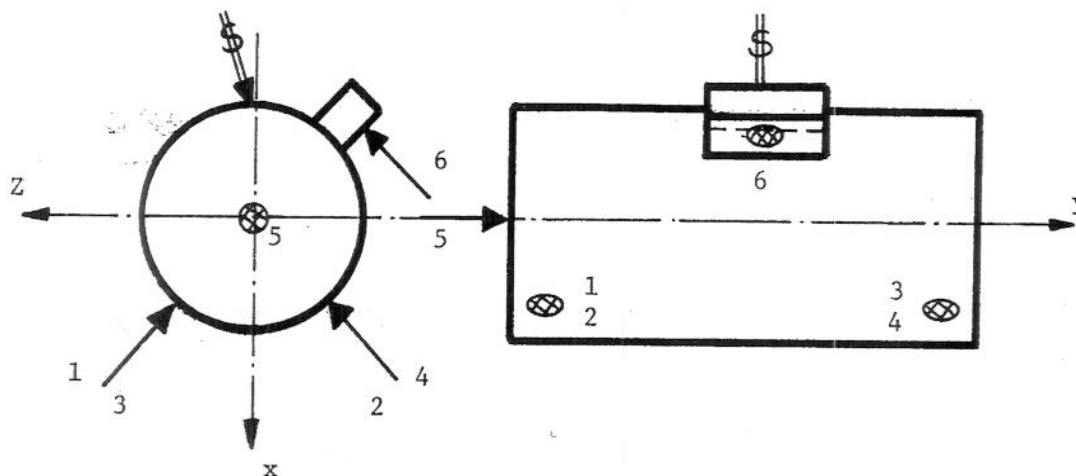


Figure 8.8: Isostatisme total d'un cylindre long

- 1, 2, 3, 4 - CENTRAGE LONG
- 5 - BUTEE AXIALE
- 6 - LOCATION (locating).

Le serrage sera un contact additionnel mais non une nouvelle liaison.

- Remarque:
- 1- Si sur une pièce, quelle que soit sa forme, plus de six liaisons sont appliquées, des liaisons s'opposent à un même degré de liberté. Le montage ne sera plus isostatique mais hyperstatique.
  - 2- Dans le cas où moins de six liaisons sont requises, attention aux liaisons qui assurent la même fonction de retenue.

### 8.3.d) L'isostatisme d'une forme prismatique

La forme prismatique ou parallélépipède rectangle se positionne isostatiquement par six liaisons aussi espacées que possible et disposées comme suit dans le trièdre OXYZ (figure 8.9).

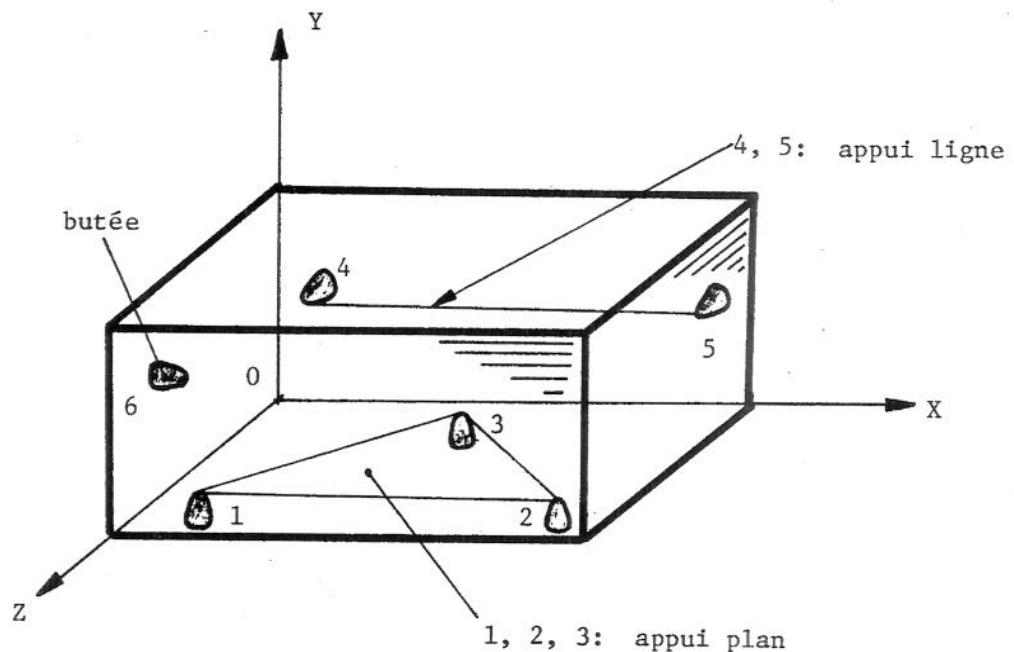


Figure 8.9: Isostatisme du parallélépipède rectangle.

Ces six liaisons se divisent en trois groupes fonctionnels:

1, 2, 3 (APPUI PLAN) de préférence sur la plus grande surface.

4, 5 (APPUI LIGNE) sur une longue surface perpendiculaire à la surface de l'appui plan.

6 (BUTEE AXIALE) appliquée au centre d'une des deux surfaces perpendiculaires aux deux précédentes formant les appuis plan et ligne.





Tout en respectant les localisations présentées ci-dessus et afin de donner une meilleure stabilité au parallélépipède, les liaisons doivent être espacées sur leur surface respective.

#### 8.4 Symbolisation et configuration physique des liaisons et des serrages

Sur un montage d'usinage, les surfaces brutes ou usinées de la pièce reposent sur des liaisons qui assurent son positionnement. La pièce doit également être bloquée afin qu'elle demeure toujours en contact avec les liaisons lorsque les efforts de coupe sont exercés.

##### 8.4.a) Symbolisation

En réalité, les symboles de liaison sont très nombreux et leur connaissance s'adresse plutôt au personnel du bureau des méthodes dont la tâche est de préparer les usinages. Le but de ce chapitre est plutôt orienté vers le choix judicieux des localisations des liaisons. De ce fait, nous nous limiterons à des symboles très simples tels qu'introduits au paragraphe 8.3.a. Le tableau ci-dessous présente les symboles que nous adopterons.

|                                | vue latérale   | vue frontale<br>(cachée ou non)   |
|--------------------------------|--|---|
| liaisons sur<br>surface usinée |  |  |
| liaisons sur<br>surface brute  |  |  |

##### 8.4.b) Configuration physique des liaisons et des serrages

###### \* Les surfaces brutes

Sur une surface brute, il est suggéré d'employer des liaisons avec contacts bombés, striés ou à griffes. L'aire de contact est faible. Les stries et les griffes réduisent les possibilités de glissement ou de soulèvement de la pièce. Des liaisons à surfaces brutes sont dessinées à la figure 8.10.

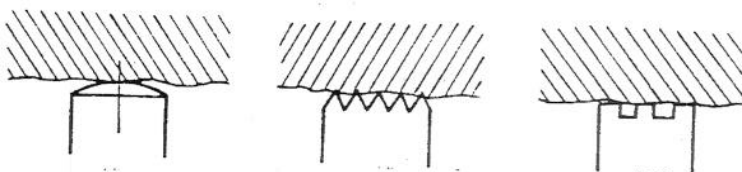


Figure 8.10: Les liaisons simples pour surfaces brutes. Le contact est (a) bombé, (b) strié et (c) à griffes.

#### \* Le palonnier

Des appuis peuvent être installés sur un palonnier qui accroît la surface du polygone d'appui d'un appui plan comme le montre la figure 8.11.

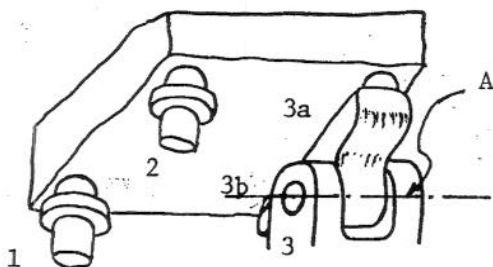
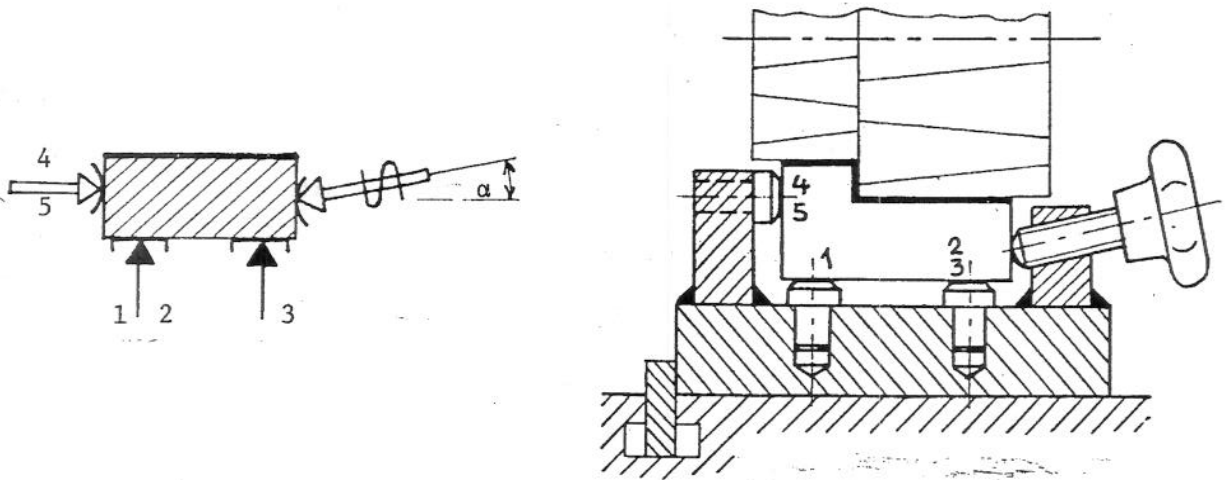


Figure 8.11: Un appui plan avec palonnier. Le palonnier compte pour une seule liaison malgré ses deux appuis.

Le palonnier possède deux contacts, 3a et 3b qui ne comptent que pour une seule liaison 3 car il peut pivoter librement autour de l'axe A.

#### \* Les appuis de serrage

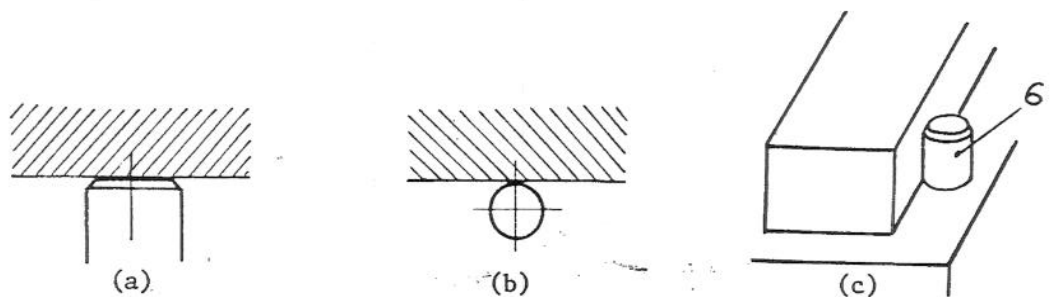
Les appuis de serrage ont les mêmes formes que les liaisons correspondantes. La figure 8.12 montre le positionnement isostatique et le serrage d'une pièce de forme prismatique en fraisage. L'angle  $\alpha$  donné à l'axe de la vis de serrage assure un meilleur contact entre la pièce et ses cinq liaisons (1, 2, 3 appui plan et 4, 5 appui ligne).



**Figure 8.12:** Un serrage en fraisage. L'angle  $\alpha$  donné à la vis de serrage assure le contact entre la pièce et les liaisons durant le serrage et l'usinage. ( $\alpha \text{ max} = 10^\circ$ )

**\* Les surfaces usinées**

Sur les surfaces usinées, l'aire de contact des liaisons doit être assez important pour ne pas marquer la surface de la pièce soumise aux efforts de coupe et de serrage. Les contacts peuvent être plans ou ligne comme montrés à la figure 8.13.



**Figure 8.13:** Les liaisons simples pour surfaces usinées.

(a) la surface est circulaire

(b) et (c) la pièce s'appuie sur la génératrice d'un cylindre.

\* Un système de localisation symétrique et de serrage

Le système de localisation symétrique et de serrage de la figure 8.14 est très utile en production. Il assure:

- le positionnement symétrique de la pièce par rapport à un axe fixe quel que soit sa largeur.
- le serrage de la pièce positionnée.

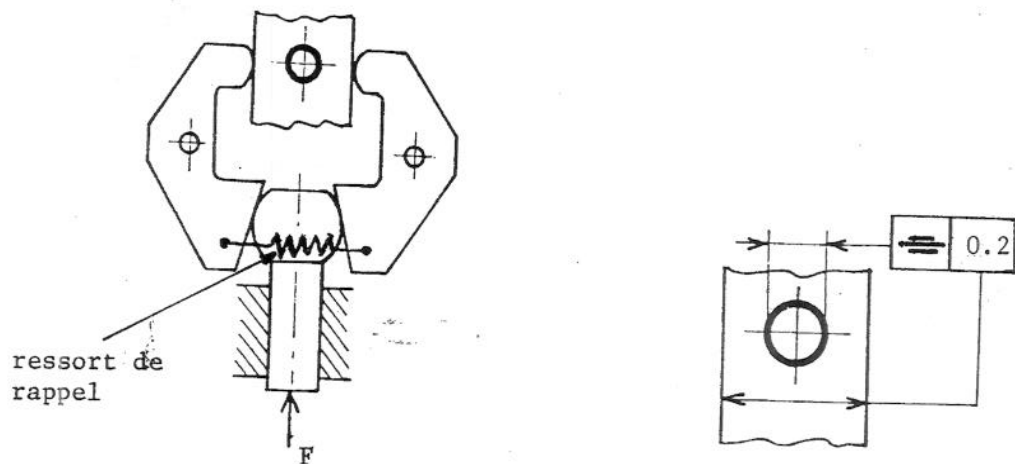


Figure 8.14. a) Un système de positionnement symétrique et de serrage.  
b) Cotation de position réalisable avec ce système.

Le temps de manoeuvre de ce système est très court car le piston de commande est souvent commandé pneumatiquement. Il faut toutefois noter que les tolérances de symétrie obtenues avec ce système dépendent de la qualité du système. Les tolérances moyennes sont de l'ordre de 0.2 mm.

\* La location (ou locating)

La liaison location a été employée dans l'isostatisme des cylindres court et long. Elle est comptabilisée comme une seule liaison. Physiquement une telle location se présente de deux façons dépendant de sa surface d'appui comme le montre la figure 8.15.

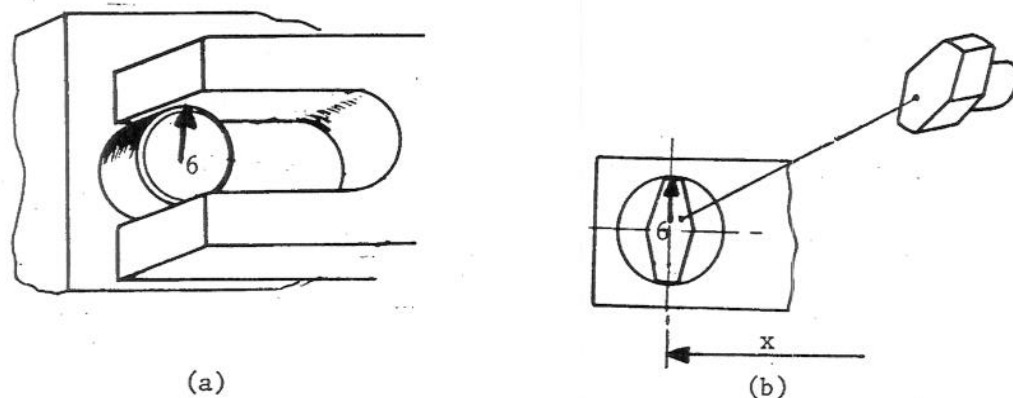


Figure 8.15: Deux types de location (locating)  
 (a) dans une rainure. Le locating est cylindrique  
 (b) dans un trou. Le locating est en forme de losange afin de toujours assurer le montage et le positionnement de la pièce même avec une large tolérance de la cote  $x$ .

\* Concrétisation d'un repérage isostatique

La figure 8.16.a montre une pièce circulaire repérée isostatiquement pour percer les trous A. Ce repérage comprend:

- un appui plan: 1, 2, 3
- un centrage court: 4, 5
- une location dans un trou: 6

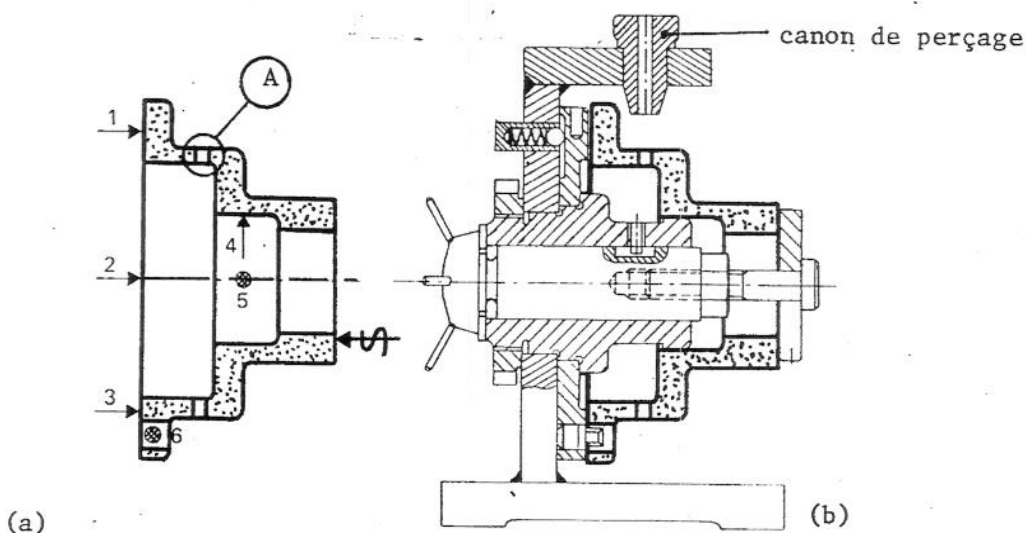


Figure 8.16: (a) Repérage isostatique choisi pour percer le trou A  
 (b) Montage d'usinage assurant ce repérage isostatique.

Ce repérage est concrétisé par le montage d'usinage montré à la figure 8.16.b. Noter la faible largeur du centrage court du montage. La location 6 dans le trou est identique à celle présentée à la figure 8.15.b. Un canon de perçage est installé sur le montage pour guider le foret.

## 8.5 Le serrage

Le serrage peut paraître parfois facile à placer sur une pièce déjà positionnée avec cinq ou six liaisons. En effet, une seule localisation doit garantir autant que possible que :

- le serrage assure contact entre la pièce et les liaisons aussi bien durant le serrage que l'usinage. Cette fonction du serrage doit être remplie dans tous les cas quels que soient la pièce et l'usinage.
- le serrage ne doit pas déformer la pièce avant l'usinage. La figure 8.17 montre un exemple où la forme de la pièce a dû être modifiée pour assurer un serrage direct ne comprimant que de la matière et non la structure flexible de la pièce.
- le serrage doit également se situer autant que possible le plus proche possible des points d'application des efforts de coupe. Lorsque les parois de la pièce sont minces, cette précaution évite toutes déformations de la pièce sous les efforts de coupe. Des appuis hydrauliques peuvent aussi soutenir la pièce lorsque le serrage ne peut pas se situer près des surfaces à usiner.

Les exercices relatifs à ce chapitre permettront de vérifier et d'appliquer constamment ces trois fonctions essentielles du serrage. Dans la plupart des cas un compromis sera nécessaire car une localisation de serrage remplit rarement les trois fonctions à la fois.



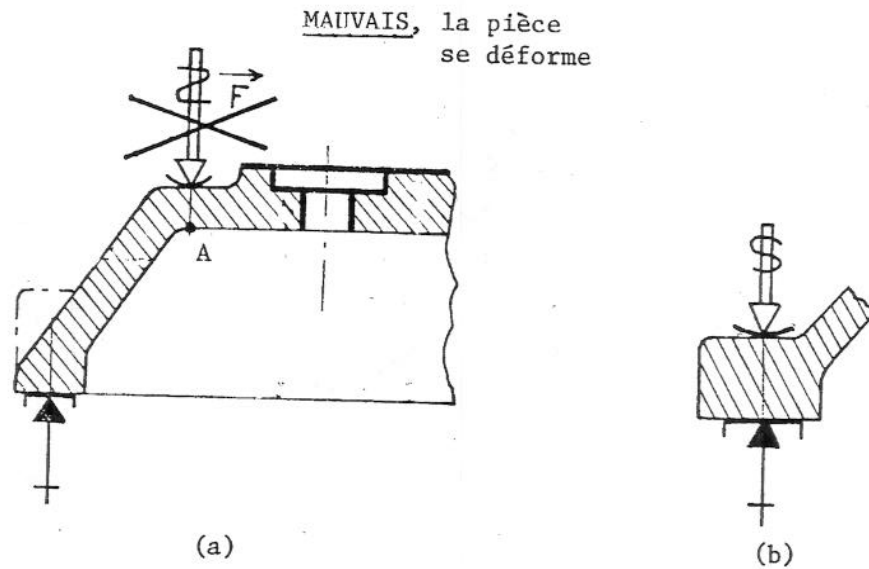


Figure 8.17: (a) Un serrage ainsi localisé déforme la pièce. La pièce sera usinée dans un état déformé. Un appui réglable en A peut éviter cet affaissement.  
(b) La pièce peut être conçue avec un bossage afin de recevoir le serrage. Cette solution est préférable mais doit être envisagée dès la fonderie.

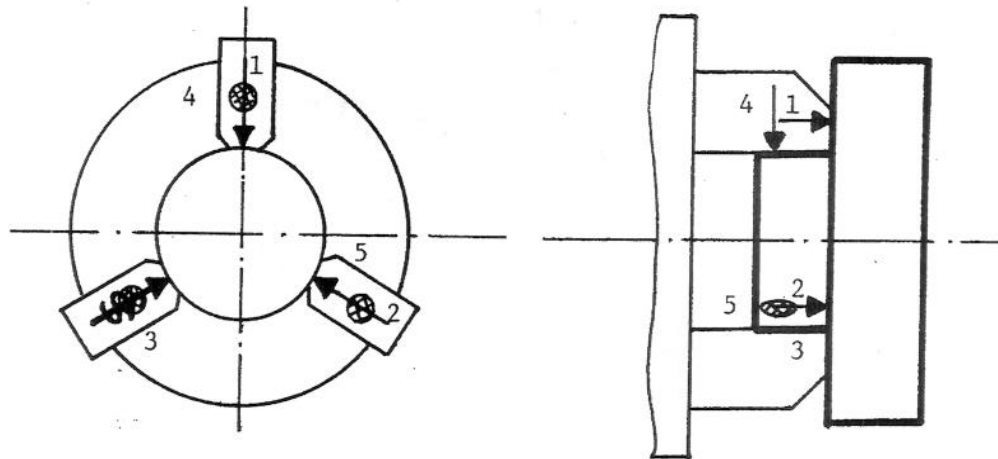
#### 8.6 Isostatisme des systèmes de positionnement et de serrage courants

Cette section présente l'aspect isostatique des plus courants systèmes de positionnement et de serrage.

\* Le mandrin trois mors (voir figure 7.30.a) peut assurer deux positionnements isostatiques dépendant de la longueur de la pièce.

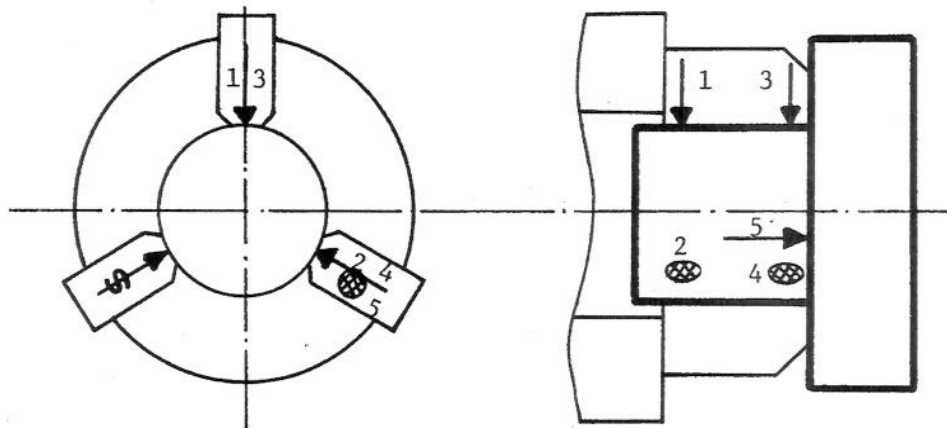
A la figure 8.18, le mandrin positionne et serre une pièce circulaire courte entre ses trois mors. A cause de la faible longueur du diamètre de prise le centrage est court. On considère que deux mors assurent le centrage court (4,5) alors que le troisième garantit le serrage. A la section 8.3.b, le centrage court a été présenté comme étant deux liaisons à 90 degrés l'une par rapport à l'autre; dans le cas du mandrin trois mors, cet angle de 90 degrés n'est pas respecté, les mors étant à 120 degrés les uns par rapport aux autres.

L'appui plan (1, 2, 3) est assuré par contacts de la pièce sur les faces latérales des trois mors.



**Figure 8.18:** Serrage et positionnement d'une pièce cylindrique courte sur mandrin trois mors. Appui plan et centrage court avec serrage.

Le montage de la figure 8.19 représente une pièce cylindrique longue. Deux mors réalisent un centrage long (1, 2, 3, 4) à 120 degrés alors que le troisième assure le serrage. La butée axiale 5 est la liaison entre la pièce et une des faces latérales des trois mors.



**Figure 8.19:** Serrage et positionnement d'une pièce cylindrique longue sur mandrin trois mors. Butée axiale et centrage long avec serrage.

\* La pince de serrage de la figure 7.30.c, très utilisée en tournage, est conçue pour garantir un centrage long plutôt qu'un centrage court.

\* Les montages d'usinage peuvent aussi être conçus pour assurer des centrages courts ou longs et des appuis plan. La figure 8.20 montre deux conceptions de montage.

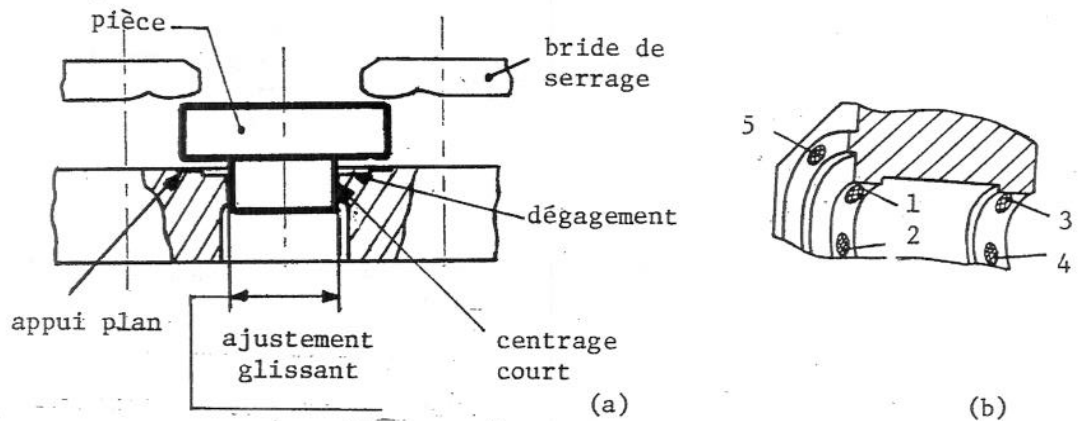
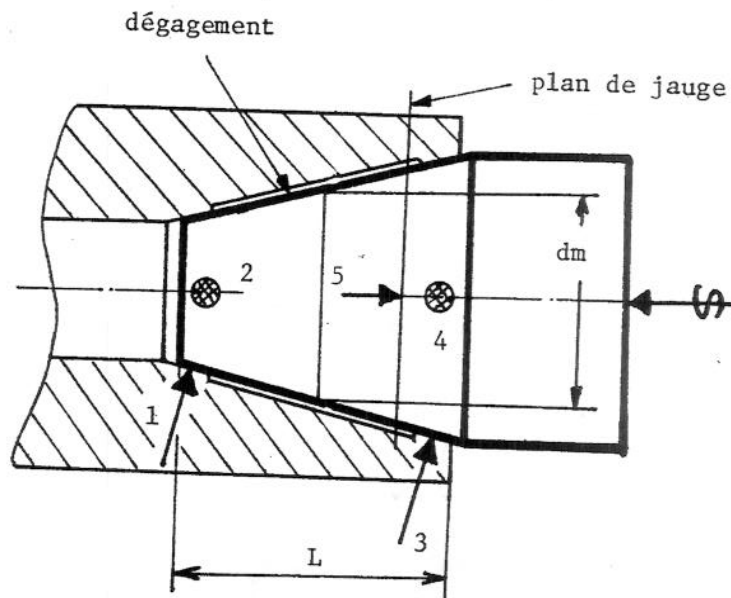


Figure 8.20: (a) Montage d'usinage avec appui plan et centrage court  
(b) Montage d'usinage avec centrage long et butée axiale.  
Remarquer le dégagement entre les liaisons 1, 2 et 3, 4 qui assure la stabilité du centrage long.

\* Un cône relativement long représente un appui à cinq liaisons à condition que:

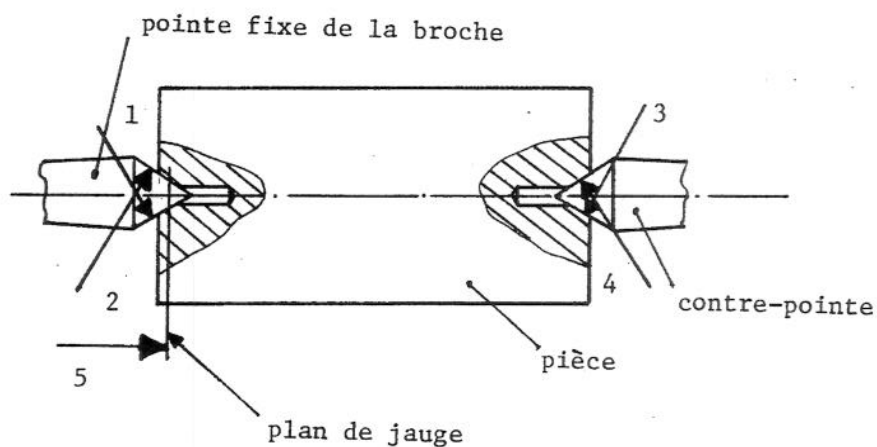
- son demi-angle au sommet soit inférieur à 45 degrés.
- son diamètre moyen  $d_m$  soit égal ou inférieur à sa longueur axiale de portée  $L$ .

La figure 8.21 montre le repérage isostatique d'un tel cône. Les portées extrêmes garantissent le centrage long 1, 2, 3, 4. La butée axiale 5 est placée sur le plan de jauge du cône (plan de jauge: voir cotation fonctionnelle, paragraphe 4.7.b).



**Figure 8.21:** Repérage isostatique d'un positionnement par cône long. Centrage long et butée axiale.

\* Le montage entre pointes, rapide et fiable en tournage, offre un centrage long et une butée axiale (5 liaisons). Comme le montre la figure 8.22, chacune des deux pointes aux extrémités de la pièce font office de centrage court 1, 2 et 3, 4 pour concrétiser un excellent centrage long. La pointe fixe de la broche assume le rôle de la butée axiale 5 car toutes les pièces viendront s'appuyer sur cette pointe quelles que soient leurs longueurs.



**Figure 8.22:** Repérage isostatique du montage entre pointes. Centrage long et butée axiale.

Le serrage de la pièce montée entre pointes est assuré par la compression créée par les deux pointes sur la pièce. Le sixième degré de liberté, non retenu, est la rotation de la pièce autour de son axe. Cette rotation est réalisée par l'intermédiaire du toc (figure 7.31) ou d'une griffe d'entraînement.

Une lunette de soutien (figure 7.32), employée pour éviter tout fléchissement de la pièce, fait office de :

- simple appui mais pas de liaison si la contre-pointe demeure installée.
- de centrage court si la pièce n'est pas supportée à droite par une contre-pointe. Attention au serrage qui doit être assuré à gauche.

\* Le montage entre mandrin et contre-pointe assure aussi cinq liaisons tout comme le montage entre-pointe à la seule différence que la localisation de l'axe est moins rigoureuse du côté mandrin. (défaut de coaxialité:  $\phi 0.1$  à  $\phi 0.3$  mm).

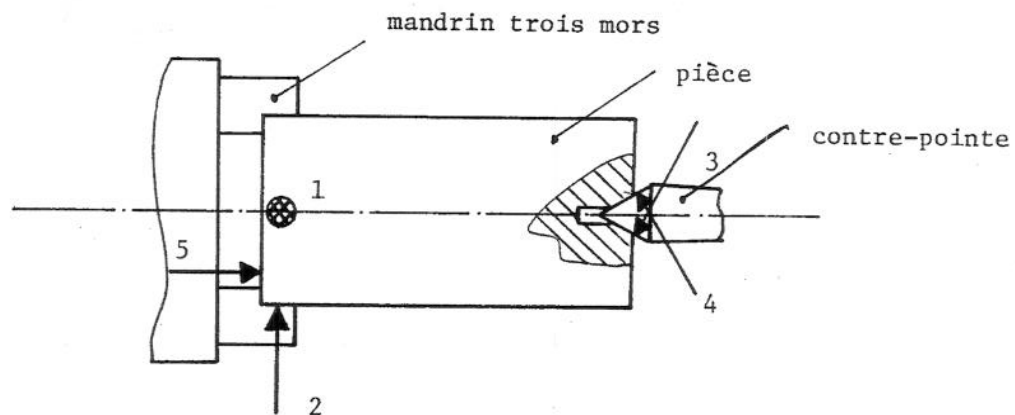


Figure 8.23: Repérage isostatique du montage entre mandrin et contre-pointe.

## 8.7 Application de l'isostatisme

Comme mentionné au début de ce chapitre, l'isostatisme est la théorie qui permet d'étudier le positionnement d'une pièce afin de l'usiner en respectant sa cotation du dessin de définition. Cette cotation inclut bien sûr les cotations dimensionnelle et géométrique.

Les liaisons ne peuvent être placées que lorsque les points suivants auront été étudiés:

- la cotation de la pièce
- les différentes formes de la pièce
- les usinages à réaliser et réalisés.

Les trois exemples suivants sont une introduction aux exercices relatifs à ce chapitre.

Exemple # 1:

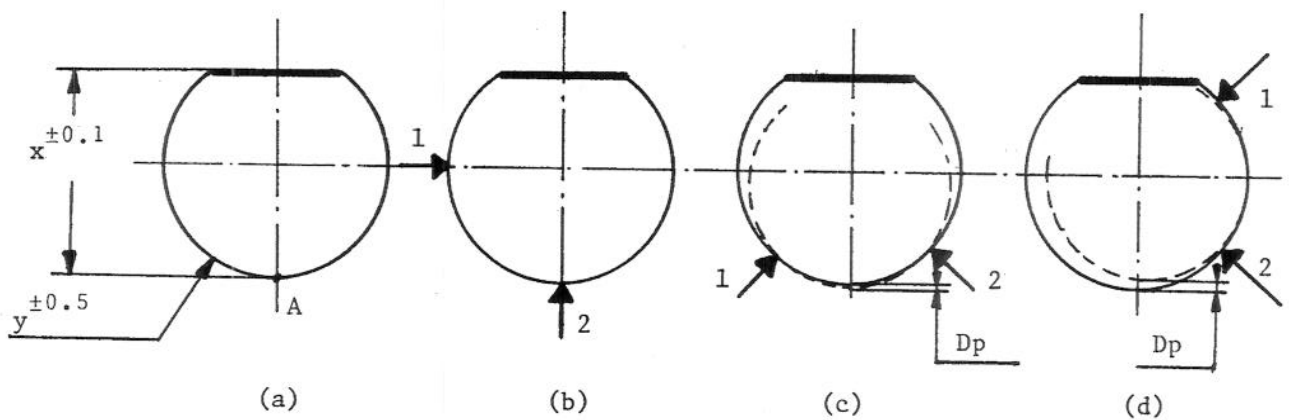


Figure 8.24: L'isostatisme et le respect d'une cote de définition.

Question: La figure 8.24.a montre un profil de pièce circulaire où un plat, en trait fort, est à usiner. Cet usinage doit être réalisé à la cote  $x \pm 0,1$ . Sachant que le diamètre du cylindre est  $y \pm 0,5$ , quel repérage isostatique choisir afin de respecter la cote tolérancée  $x$  pour une grande série de pièces?

Solution: La solution de la figure 8.24.b permet de réaliser directement la cote de définition  $x$ . La liaison 2 prend appui en A qui est le départ de la cote  $x$ . Il est très important de noter que la cote  $x$  ainsi obtenue sera indépendante de la valeur du diamètre  $y$  du cylindre. Dans ce cas, la cote de fabrication est directement la cote de définition  $x$ .

Les deux solutions présentées aux figures 7.24.c et d n'ont plus de liaison en A. Dans ces deux cas, une variation du diamètre  $y$  de la pièce aura un effet direct sur la cote  $x$ . Les dispersions  $D_p$  sont à inclure dans l'intervalle de tolérance de la cote  $x$ . Les cotes de fabrication ne sont plus directement la cote de définition  $x$ .

Remarque: La solution de la figure 8.24.b est en effet idéale mais même dans ce cas, la dispersion au contact n'est pas nulle. Ceci peut être dû:

- à la forme de l'appui
- aux rugosités de surface
- aux écarts de forme de surfaces de la pièce

Le tableau 8.1 donne la plage des dispersions inévitables à un contact pièce/liaison.

| Nature de la surface de la pièce                           | Dispersion (mm.) |
|--|------------------|
| Surface brute grossière: ● moulage au sable<br>● estampage | 0.2 à 1.2        |
| Surface brute soignée: montage en coquille                 | 0.1 à 0.6        |
| Surface usinée   | 0.005 à 0.05     |

Tableau 8.1: Plages des dispersions dues au contact pièce/liaison.

Exemple # 2:

Soit la pièce de la figure 8.25.a où les surfaces en trait fort sont à usiner. Les cotes encadrées sont des cotes prises à partir d'une surface brute.

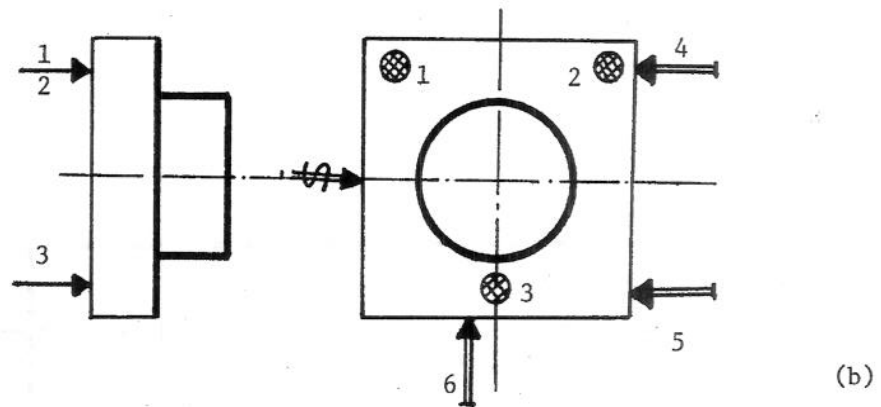
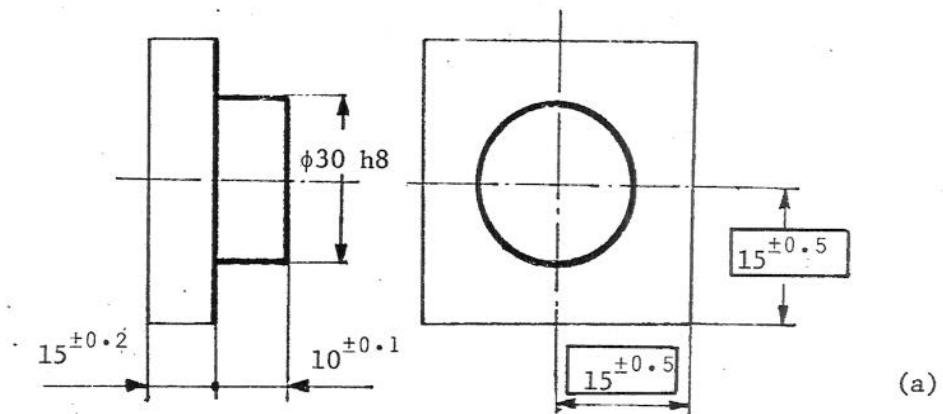


Figure 8.25: Usinage et repérage isostatique  
 (a) Les surfaces en trait fort sont à usiner  
 (b) La solution de l'isostatisme proposé

Question: Indiquer le repérage isostatique et le serrage pour réaliser l'usinage en trait fort.



Solution: (figure 8.25.b). La surface arrière est déjà usinée et a une grande superficie, elle est retenue comme appui plan 1, 2, 3 donnant ainsi la cote  $15^{+0.2}$ . Une des deux faces latérales brutes reçoit un appui ligne 4, 5 (attention, il faut que ce soit une surface d'où part une cote  $15^{+0.5}$ ). L'autre surface latérale d'où part la deuxième cote de  $15^{+0.5}$  reçoit la butée 6.

Exemple # 3

Soit la pièce de la figure 8.26.a où la rainure de 14 H9 (en trait fort) est à usiner. La cote de 70 encadrée est prise entre deux surfaces brutes.

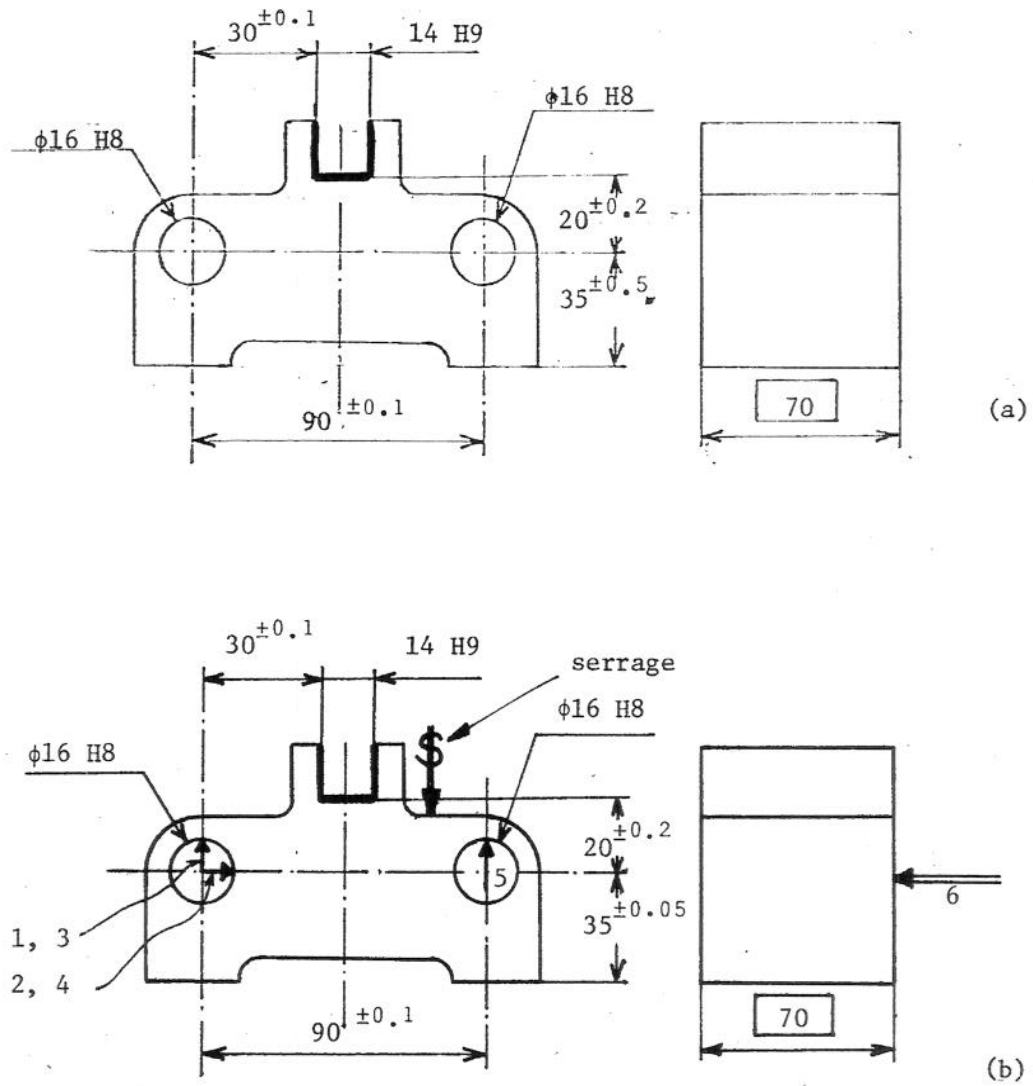


Figure 8.26: (a) La rainure en trait fort est à usiner  
(b) Le repérage isostatique et le serrage proposés pour cet usinage.

Question: Indiquer le repérage isostatique et le serrage requis pour usiner la rainure en trait fort.

Solution: (figure 8.26.b)

Le fond de la rainure est coté par rapport aux axes des trous 16 H8; c'est la cote de  $20^{+0.2}$  qu'il faut obtenir. La position latérale de la rainure est cotée par rapport à un des deux alésages de 16 H8.

L'alésage de gauche peut faire office de centrage long 1, 2, 3, 4, sa longueur est supérieure à son diamètre. Avec une simple location (locating) 5 dans le deuxième alésage, les cotes de fabrication  $20^{+0.2}$  et  $30^{+0.1}$  sont directement obtenues. La liaison 6, sur brut, retient la pièce latéralement.

Le serrage est appliqué proche des surfaces à usiner et assure le contact à la liaison 5. La pièce est robuste et ne risque pas de se déformer sous les efforts de serrage.

Remarque: Si la pièce avait été positionnée sur sa surface de base. La cote de  $20^{+0.2}$  n'aurait pas pu être obtenue directement. Dans ce cas, UN TRANSFERT DE COTES est nécessaire. Le prochain chapitre traite des cas semblables.



## CHAPITRE IX

### LE TRANSFERT DE COTES ET D'ORIENTATIONS

#### 9.1 Introduction

Les quatre principales étapes d'obtention d'un produit commercialisable sont chronologiquement les suivantes:

1. L'étude fonctionnelle et la conception. A partir d'un besoin précis, le bureau d'études conçoit un dessin d'ensemble où les différentes pièces sont calculées et les matériaux sont choisis. La cotation fonctionnelle de ce dessin d'ensemble permet de dessiner séparément chaque pièce avec leurs cotes fonctionnelles de dimensions, de formes et de positions (chapitre # 4).
2. La préparation de la réalisation. A partir du dessin de définition de chaque pièce, le bureau des méthodes prépare l'usinage, c'est-à-dire qu'il choisit la séquence d'usinage, les machines-outils, les outils, les montages d'usinage avec leurs repérages isostatiques et serrage. Cette préparation doit permettre d'obtenir les pièces finies conformes à leur dessin de définition.
3. La fabrication des pièces conformément aux préparations du bureau des méthodes. Les dimensions réalisées sur la pièce sont les cotes de fabrication qui peuvent être aussi bien des cotes appareillages (ou de montage), des cotes outils et des cotes machines.
4. Le contrôle. Toutes ou quelques pièces, dans le cas de lots, sont contrôlées en métrologie. Ces pièces sont vérifiées par rapport à leur dessin de définition comprenant les cotes fonctionnelles et non les cotes de fabrication.

Le but du présent chapitre est de clarifier la différence entre les cotes fonctionnelles et les cotes de fabrication. C'est le transfert de cotes qui permettra le passage d'un type de cotes à l'autre. Avant de traiter le transfert de cotes et d'orientations, nous allons d'abord préciser l'appellation "cote de fabrication".

## 9.2 Les cotes de fabrication

Il existe trois catégories de cotes de fabrication: les cotes machines (Cm), les cotes outils (Co) et les cotes appareillages (Ca).

### 9.2.a Les cotes machines, Cm

Définition: Les cotes machines sont les cotes réalisées en contrôlant les déplacements des porte-outils et/ou des porte-pièces. Ces contrôles peuvent être assurés manuellement, par des butées mécaniques ou bien numériquement (CNC). Les cotes peuvent être obtenues de façon absolue ou incrémentale.

#### \* Cotes machines en absolu

La figure 9.1 montre un usinage au tour où la pièce est positionnée par un appui plan et un centrage court. Les cotes de fabrication a, b, c et d sont des cotes machines partant toutes du même référentiel, l'appui plan. Tous les déplacements des différents outils sont référencés à cet appui plan.

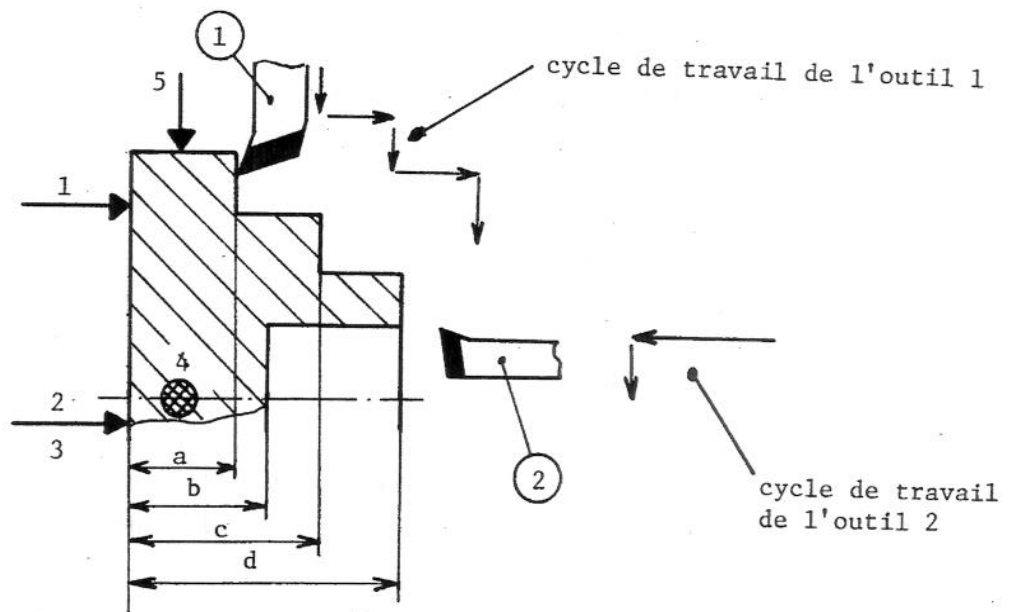


Figure 9.1: Travail en absolu. Toutes les cotes machines ont le même référentiel, l'appui plan 1, 2, 3.

Les pièces cotées et réalisées de cette manière sont rares, un usinage en absolu demande des transferts de cotes, et ceux-ci ne sont pas toujours possibles. Le travail en absolu est adopté dans le cas de très grandes séries.

\* Cotes machines en incrémental

Le même usinage de la figure 9.1 est présenté à la figure 9.2 selon une cotation incrémentale. Toutes les cotes sont aussi des cotes machines, elles sont obtenues suivant une séquence. Une fois la cote  $c_1$  obtenue,  $c_2$  et  $c_3$  seront réalisées. La cote  $c_4$  ne peut être obtenue qu'après  $c_3$ . Les usinages antérieurs font office de référentiel.

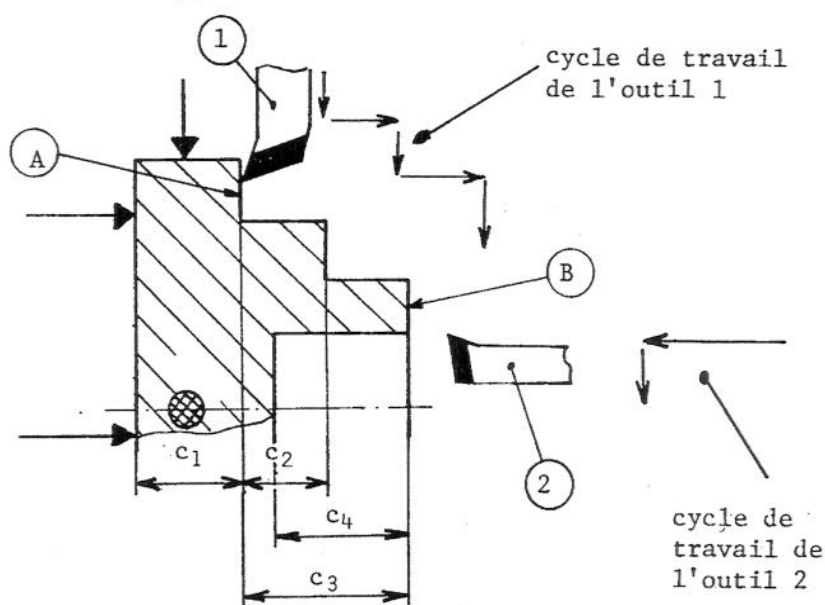


Figure 9.2: Travail en incrémental. Toutes les cotes sont des cotes machines. Les usinages antérieurs font office de référentiel sauf pour la première cote  $c_1$ .

Le travail en incrémental se rapproche plus de la cotation de définition des pièces, la machine s'ajuste à chaque usinage. Ce type de travail demande peu de transfert de cotes.

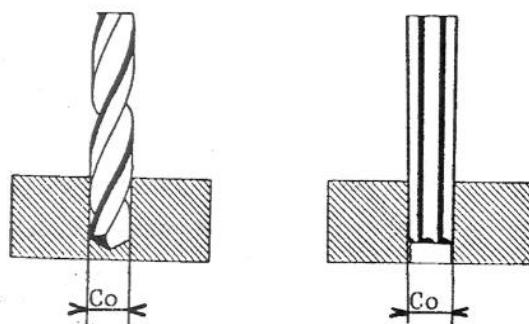
Les figures 9.1 et 9.2 ont montré un exemple de tournage où le déplacement du porte-outil est contrôlé; notons que les diamètres ( $\phi$ ) de la pièce sont également des cotes machines. Au contraire en fraisage sur fraiseuse ou sur centre d'usinage, des cotes machines sont obtenues par contrôle des déplacements du porte-pièce.

9.2.b Les cotes outils, Co

Définition: Les cotes outils sont les cotes obtenues sur les pièces usinées avec des outils reproduisant leurs dimensions propres ou réglées. Un forêt ou un alésoir usinent un trou en imposant leur diamètre de coupe à la pièce; le diamètre final du trou est une cote de fabrication de l'outil: cote outil.

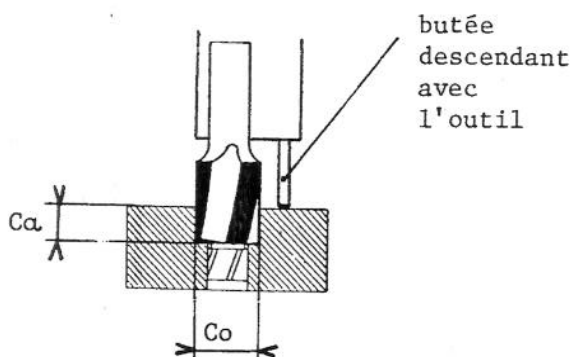
La figure 9.3 décrit différents usinages où des cotes outil sont obtenues.





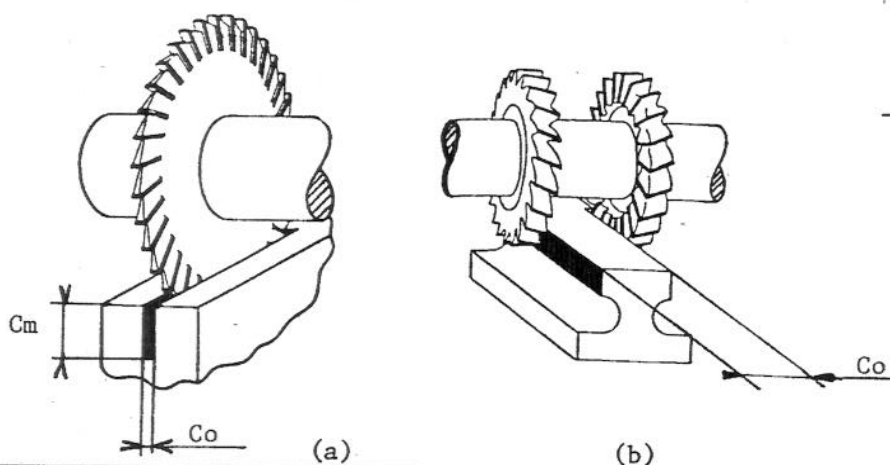
### - Perçage

Les diamètres perçés ou alésés sont des cotes outils



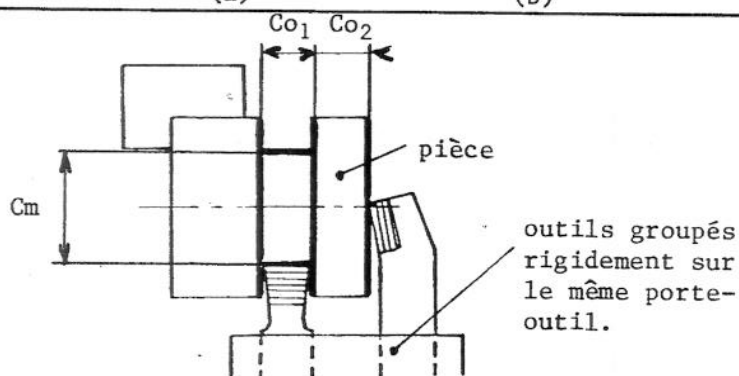
### - Outil à lamer

La profondeur du lamage est une cote outil si une butée descend avec l'outil



### - Fraises trois tailles

- (a) une seule fraise
  - (b) deux fraises montées en train de fraises.
- Co est l'épaisseur de la bague intercalée entre les deux fraises



### - Tournage

Co<sub>1</sub> est la largeur de l'outil à saigner.  
Co<sub>2</sub> est la cote de réglage des outils sur le porte-outil.

Figure 9.3: Cotes outils en perçage, fraisage et tournage.

La cote outil  $Co_2$  obtenue par tournage à la figure 9.3 provient du réglage de deux outils sur le porte-outil. En production de série, l'utilisation d'un tel montage d'outils permet un gain de temps d'usinage appréciable. Le service outillage ajuste avec précision les outils sur les porte-outils avant de les rendre opérationnels sur la machine-outil.

### 9.2.c Les cotes appareillages, $Ca$

Définition: Les cotes appareillages sont les cotes obtenues avec des appareils, des montages ou des dispositifs reproduisant leurs propres dimensions sur la pièce.

La figure 9.4 est le dessin d'un montage de perçage pour percer les deux trous A. Durant le perçage, le forêt est guidé dans les canons de perçage. Le montage est positionné dans le grand alésage central de la pièce. Les deux cotes appareillages  $Ca$  sont les distances entre l'axe de l'alésage de centrage et l'axe des trous.

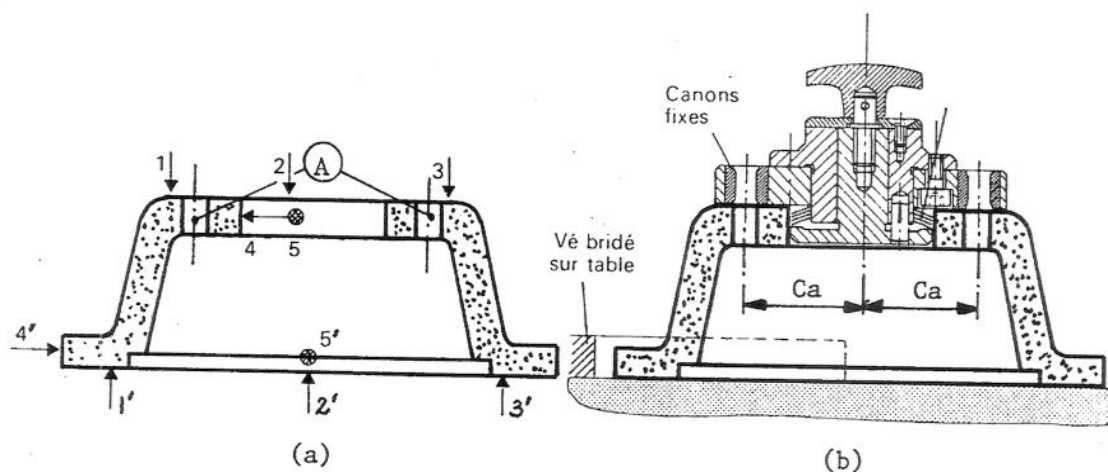


Figure 9.4: Travail en montage de perçage  
 (a) le repérage isostatique nécessaire pour percer les deux trous A.  
 (b) le montage installé sur la pièce avec les cotes appareillages  $Ca$ .

Une cote appareillage Ca peut également provenir d'un réglage de la machine-outil, par exemple:

- les distances entre-axes des broches préréglées sur une perceuse multi-broches (voir la figure 7.12).
- les profils et les cotes réalisés sur une machine-outil à copier.

### 9.3 Transfert de cotes dimensionnelles

Un outil en place sur une machine-outil réalise sur la pièce une cote par rapport au référentiel de réglage. Cette cote est une cote de fabrication, elle peut être directement ou non une cote fonctionnelle. Dans le cas où cette correspondance directe n'existe pas, le transfert entre la cote fonctionnelle et la cote de fabrication est obligatoire.

#### 9.3.a Présentation de la méthode (exemple # 1)

Le bureau d'études fournit le dessin de définition de la figure 9.5 avec ses cotes fonctionnelles A et B. Le bureau des méthodes a à étudier l'usinage des deux surfaces en trait fort a et b.

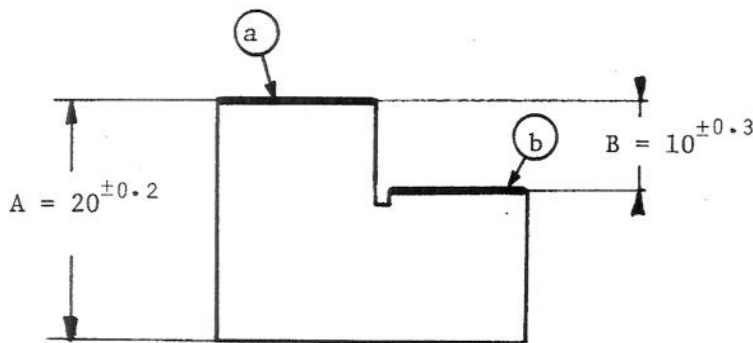


Figure 9.5: Dessin de définition du bureau d'études avec ses cotes fonctionnelles A et B.

Le bureau des méthodes décide, pour des raisons pratiques et économiques, d'usiner ces deux surfaces en trait fort en absolu c'est-à-dire par rapport au même référentiel, la base de la pièce tel que le montre le croquis de phase de la figure 9.6.

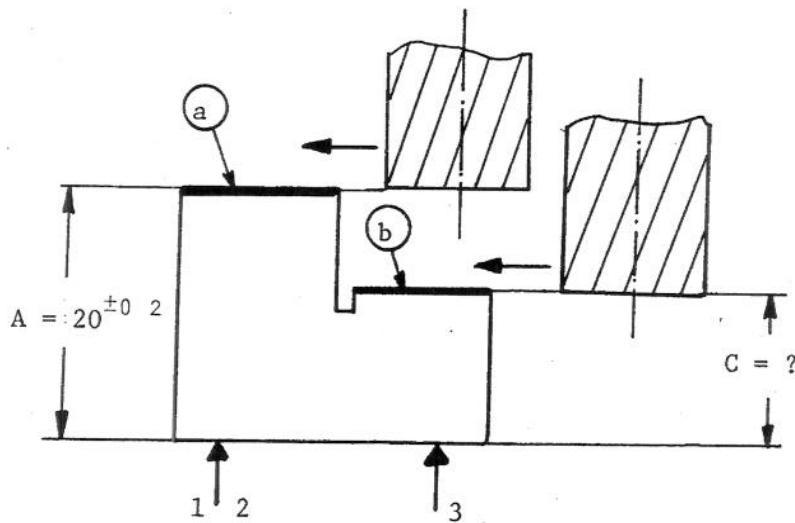


Figure 9.6: Dessin de phase de l'usinage des surfaces a et b. Les deux cotes de fabrication partent du même référentiel.

Pour l'usinage de la surface a, la cote de fabrication A sera directement la cote fonctionnelle. Il n'y aura pas la nécessité d'un transfert de cote. A contraire pour l'usinage de la surface b, la cote fonctionnelle B n'est pas la cote de fabrication C (cote machine). Un transfert de cotes sera obligatoire pour calculer la cote de fabrication C.

#### Méthode du transfert de cotes

Le transfert de cotes consiste à tracer et résoudre une chaîne de cotes dont le "jeu fonctionnel" J est la cote fonctionnelle à remplacer. La cote de fabrication recherchée doit être incluse parmi les autres cotes de la chaîne.

Les règles générales du tracé des chaînes de cotes sont celles introduites à la section 4.3 du chapitre # 4 (cotation fonctionnelle). Il en est de même pour l'interdépendance des tolérances des cotes (équations 4.6, 4.7 et 4.9 de la section 4.5).

A la figure 9.7, la méthode précitée est appliquée pour le transfert de cotes nécessaire au calcul de la cote de fabrication C.

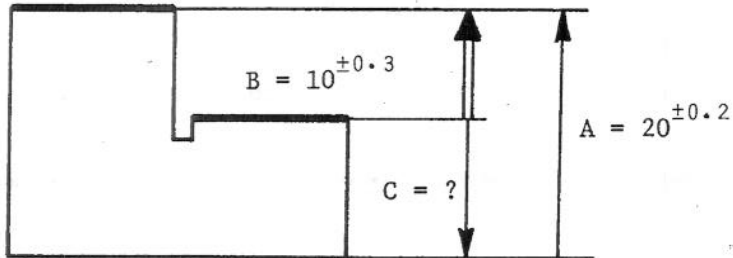


Figure 9.7: Chaîne de cotes du transfert de cote. Le "jeu fonctionnel" est la cote fonctionnel à remplacer.

Le "jeu fonctionnel" de la chaîne de cotes est la cote fonctionnelle à remplacer B,  $10^{\pm 0.3}$ . Pour la chaîne de la figure 9.7, les équations d'interdépendance des tolérances s'écrivent:

$$\text{IT de B} = \text{IT de A} + \text{IT de C} \quad (1)$$

$$B \text{ max} = A \text{ max} - C \text{ min} \quad (2)$$

$$B \text{ min} = A \text{ min} - C \text{ max} \quad (3)$$

L'équation (1) permet de calculer l'intervalle de tolérance que devra posséder la cote C.

$$\text{IT de C} = \text{IT de B} - \text{IT de A} = 0.6 - 0.4 = 0.2 \text{ mm}$$

L'équation (2) ou (3) donnera une des limites de la cote C.

équation (2):  $C \text{ min} = A \text{ max} - B \text{ max} = 20.2 - 10.3 = \underline{9.9 \text{ mm}}$

Puisque  $\text{IT de C} = 0.2$ ,  $C \text{ max} = C \text{ min} + 0.2 = 10.1 \text{ mm}$ .

Solution:  $C = 10^{\pm 0.1}$

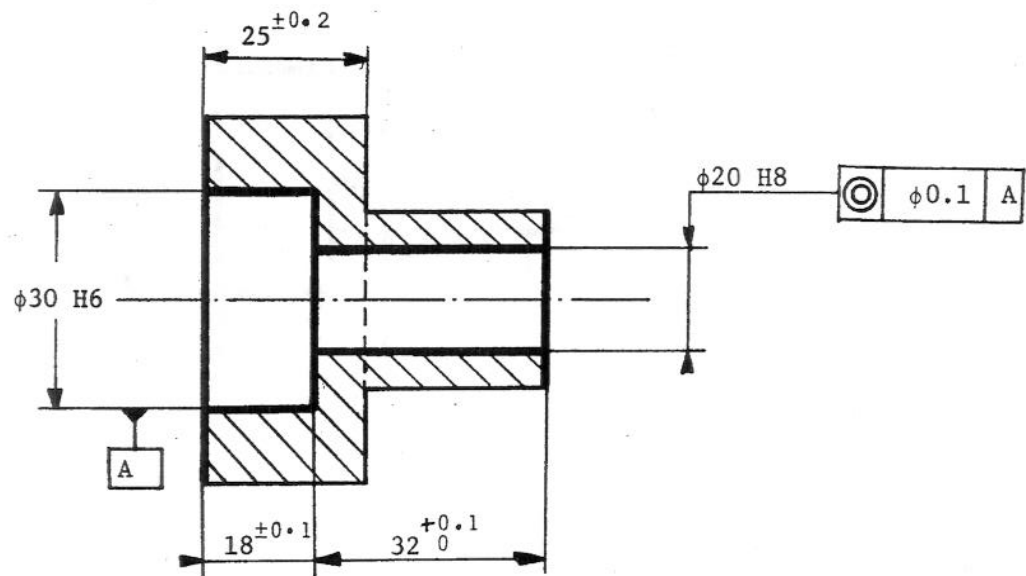
Revenons au dessin de phase de la figure 9.6. L'usinage de la surface b selon la cote de fabrication  $C = 10^{\pm 0.1}$  produira une pièce conforme avec le dessin de définition qui prescrit la cote fonctionnelle  $B = 10^{\pm 0.3}$  (figure 9.5).

Dans tous transferts de cotes, la tolérance de la cote fonctionnelle remplacée est répartie entre les cotes de la chaîne. La nouvelle cote de fabrication a donc une tolérance inférieure.

IMPORTANT: Tout transfert de cotes a pour effet de réduire l'intervalle de tolérance de la cote de fabrication par rapport à celui de la cote fonctionnelle à remplacer. La qualité demandée sera meilleur; le coût de production sera accru.

### 9.3.b Exemple # 2

La figure 9.8 ci-dessous représente le dessin de définition d'une pièce dont les surfaces en trait fort sont à usiner en tournage. Les cotes inscrites sont les cotes fonctionnelles.



**Figure 9.8:** Dessin de définition. Les surfaces en trait fort sont à usiner en tournage.

Le bureau des méthodes décide de réaliser ces usinages en deux reprises c'est-à-dire que la pièce sera installée selon deux repérages isostatiques différents. Chaque étape est appelée SOUS-PHASE.

Sous-phase # 1 (figure 9.9)

La pièce est repérée par un appui plan et un centrage court; toutes les surfaces accessibles par la droite peuvent être usinées.

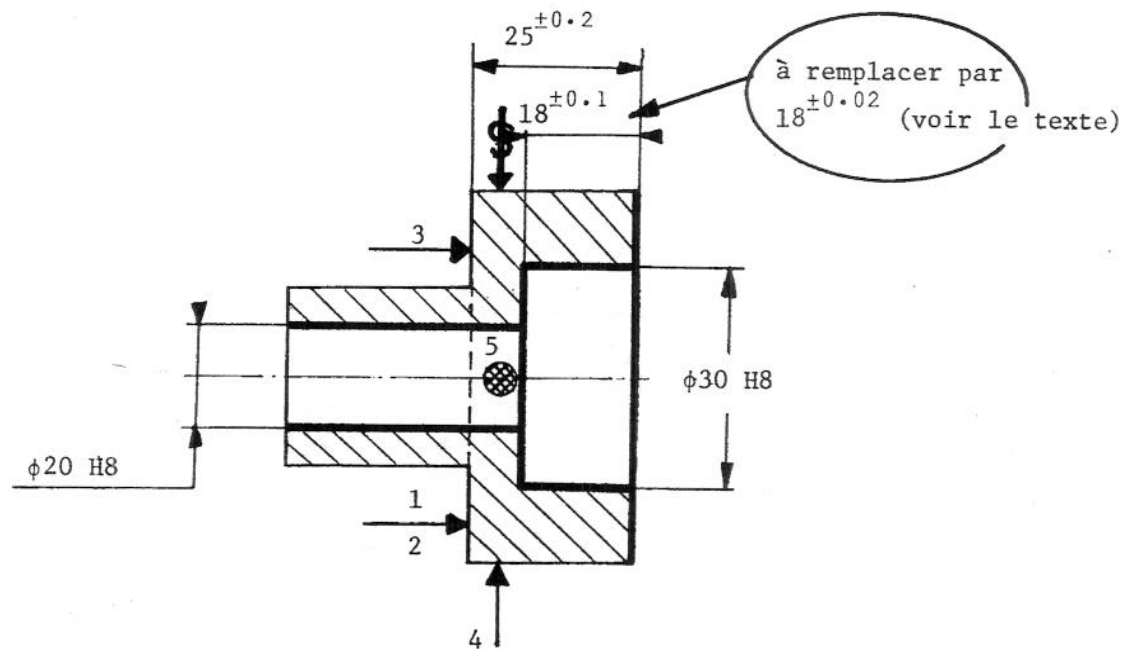


Figure 9.9: Sous-phase # 1. Les surfaces accessibles sont usinées.

Le travail étant incrémental, toutes les cotes de fabrication sont les cotes fonctionnelles du dessin de définition. Aucun transfert de cotes n'est nécessaire.

Sous-phase # 2 (figure 9.10)

La pièce est maintenant retournée pour l'usinage de la dernière face, b. La face a, usinée, fait office d'appui plan alors que le  $\phi 30$  H6 reçoit un centrage court. La cote de  $32^{+0.1}_0$  ne peut pas être la cote de fabrication puisqu'elle ne débute ni sur un appui ni sur une surface déjà usinée dans cette phase. La cote de fabrication, prise par rapport à l'appui plan, est la cote C. C n'est pas une cote de définition; un transfert de cotes est nécessaire.



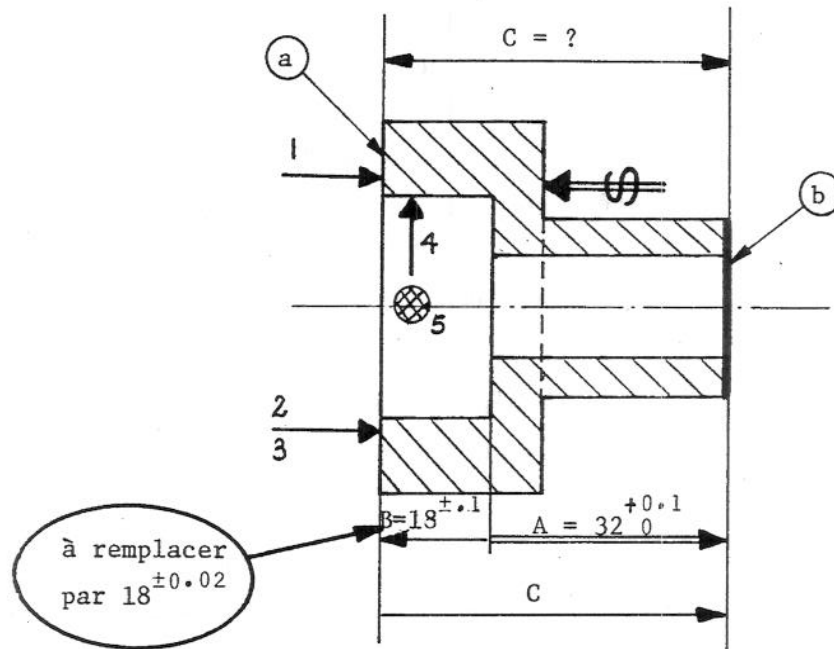


Figure 9.10: Sous-phase # 2. La cote de fabrication C de la face b demande un transfert de cotes.

Sur la figure 9.10, la chaîne de cotes du transfert est tracée. Le vecteur "fonctionnel" est la cote fonctionnelle à remplacer. C est la cote à calculer.

Répartition des intervalles de tolérances:

$$\text{IT de A} = \text{IT de B} + \text{IT de C} \quad (4)$$

$$0.1 = 0.2 + ? \quad (\text{impossible})$$

IT de C ne peut pas être négatif. IT de A ne peut pas être augmenté car c'est une cote fonctionnelle venant du bureau d'études. Une seule solution demeure: réduire IT de B afin que IT de A puisse être réparti entre les cotes B et C.

A ce stade-ci, deux choix sont à fixer: la valeur de l'intervalle de tolérance de B et sa position par rapport à la cote nominale de B, 18 mm.

\* Valeur de IT de B IT de A est à répartir entre B et C. Les valeurs nominales de B et C sont respectivement 18 et 50. Nous avons vu au chapitre # 1, qu'à qualité égale les intervalles de tolérance augmentent avec la cote nominale (tableau 1.1). Il serait normal de poser des intervalles de même qualité pour B et C:

$$(IT \text{ de } C) > (IT \text{ de } B)$$

$$\text{puisque } (C \text{ nominal} = 50) \text{ et } (B \text{ nominal} = 18)$$

Après étude rapide du tableau 1.1, les intervalles de tolérance devraient être dans le rapport 2 à 3, soit:

$$\text{équation (4): } IT \text{ de } A = IT \text{ de } B + IT \text{ de } C$$

$$0.1 = 0.04 + 0.06 \quad (5)$$

\* Position du nouveau (IT de B) par rapport à la cote nominale  
Afin de respecter les conditions fonctionnelles du bureau d'études et entre autre la cote C, la condition suivante doit être respectée:

Le nouvel intervalle de tolérance doit être situé à l'intérieur de l'ancien.

Nous aurons donc plusieurs solutions possibles pour la nouvelle cote B.  $18 \overset{+0.04}{0}$ ,  $18 \overset{0}{-0.04}$ ,  $18 \overset{+0.1}{+0.06}$ ,  $18 \overset{-0.06}{-0.1}$ ,  $18 \overset{+0.09}{+0.05}$  sont des solutions acceptables.

Choisissons  $B = 18 \overset{\pm 0.02}{\phantom{0}}$ . Maintenant le dessin de phase # 1 doit être corrigé car c'est grâce à cette nouvelle cote B que le transfert de cotes sera possible.

#### Calcul de la cote de fabrication C

A partir de la chaîne de cotes de la figure 9.10 où maintenant B est égal à  $18 \overset{\pm 0.02}{\phantom{0}}$ :

$$* A \text{ min} = C \text{ min} - B \text{ max}$$

$$C \text{ min} = A \text{ min} + B \text{ max}$$

$$= 32.0 + 18.02 = 50.02 \text{ mm}$$

$$* A \text{ max} = C \text{ max} - B \text{ min}$$

$$C \text{ max} = A \text{ max} + B \text{ min}$$

$$= 32.1 + 17.98 = 50.08 \text{ mm}$$

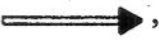
$$* \text{Vérification: } IT \text{ de } C = C \text{ max} - C \text{ min} = 50.08 -$$

$$52.02 = 0.06 \text{ (tel que posé à l'équation (5)).}$$

$$\text{Solution: } C = 50^{+0.08}_{+0.02}$$

Dans cet exemple, le transfert de cote a eu aussi pour effet de réduire les intervalles de tolérance des cotes impliquées. L'intervalle de tolérance de la cote B a été réduit au cinquième de sa valeur posée par le bureau d'études.

### 9.3.c Résumé et conclusion du transfert de cotes dimensionnelles

1. Le transfert de cotes dimensionnelles consiste à tracer une chaîne de cotes dont le vecteur "fonctionnel", , est la cote fonctionnelle à remplacer. La cote de fabrication recherchée doit être incluse parmi les autres cotes de la chaîne.

2. Résoudre la chaîne de cotes selon la procédure décrite au chapitre # 4 traitant la cotation fonctionnelle.

3. Si lors d'une répartition d'intervalles de tolérance, un ou des intervalles de tolérance de cotes fonctionnelles doivent être réduits, placer les nouveaux intervalles de tolérance à l'intérieur des bornes des anciens.

4. Le transfert de cotes réduit considérablement les tolérances des cotes de fabrication et a pour effet d'accroître les coûts de production.

5. En contrepartie, le transfert de cotes est intéressant dans de nombreux cas car il permet de réduire les temps de manipulation de pièces en augmentant la production.

6. Les transferts de cotes dimensionnelles sont les transferts les plus fréquents bien que la cotation d'orientations demande parfois des transferts. La section suivante traite un exemple de transfert de cotes de positions (parallélisme et perpendicularité).

#### 9.4 Transfert d'orientations

La cotation d'orientations (parallélisme, coaxialité, perpendicularité, ...) est également une spécification fonctionnelle que le bureau d'études mentionne sur le dessin de définition. A la fabrication, les tolérances d'orientation doivent être respectées; elles peuvent l'être directement ou indirectement. Ce deuxième cas demande un transfert de condition d'orientations. L'exemple suivant traite une application simple.

Soit la pièce des figures 9.11.a (vue en perspective) et 9.11.b (vue de face), les faces A, B et C en trait fort sont à usiner selon la cotation fonctionnelle de la figure 9.11.b. Noter que la face B doit être perpendiculaire par rapport à la face C avec la tolérance de 0.05 mm pour des raisons fonctionnelles.

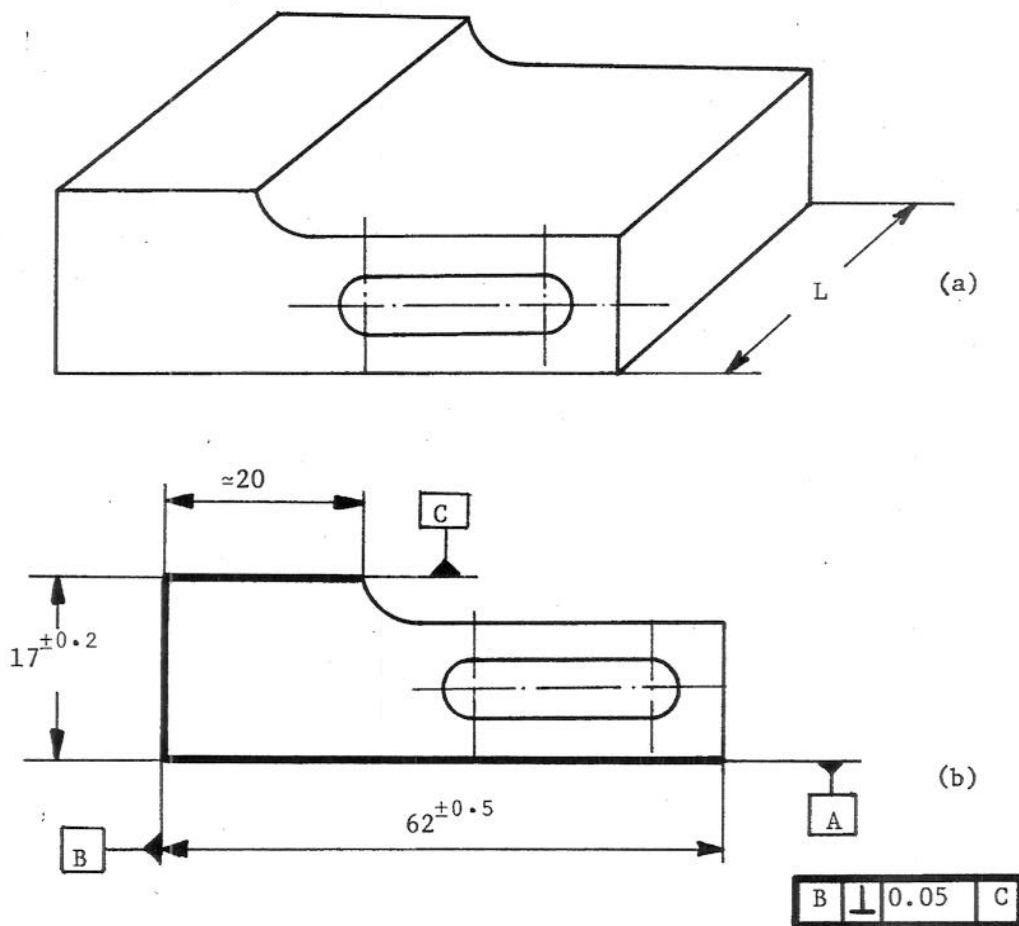


Figure 9.11: Les faces A, B et C sont à usiner d'après la cotation fonctionnelles. B doit être perpendiculaire à A avec la tolérance de 0.05 mm.

Pour des raisons propres au bureau des méthodes, celui-ci décide d'usiner la pièce en deux sous-phases en débutant l'usinage par la plus grande face, A. Dans cette même sous-phase (sans démonter la pièce), la face B est usinée. La figure 9.12 montre le repérage isostatique choisi.

Question: Quelle doit être la tolérance de perpendicularité à respecter durant cet usinage? Cette tolérance n'est pas donnée dans l'orientation fonctionnelle.

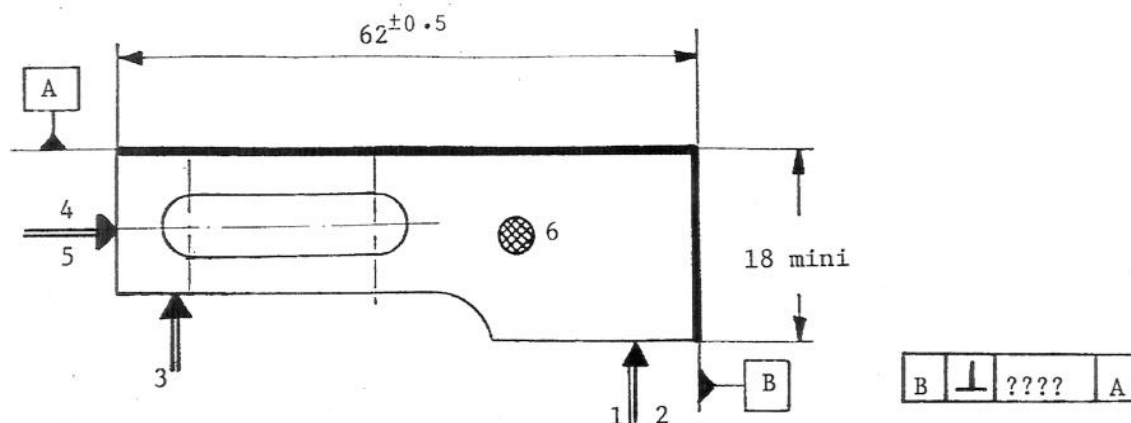


Figure 9.12: Sous-phase # 1. Les faces A et B sont dressées. Quelle doit être la tolérance de perpendicularité de fabrication entre ces deux faces?

En sous-phase # 2, la pièce est retournée pour usiner la face C tel que montré au croquis de phase de la figure 9.13 avec le repérage isostatique choisi.

Question: Quelle doit être la tolérance de parallélisme à respecter durant cet usinage? Cette tolérance n'étant pas donnée avec le dessin de définition.

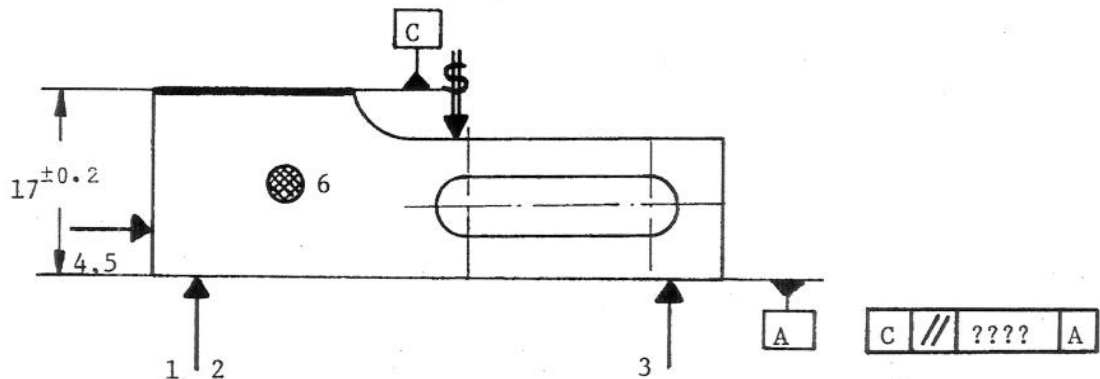
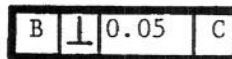


Figure 9.13: Sous-phase # 2. La troisième face C est usinée en prenant appui sur la face A déjà usinée. Quelle doit être la tolérance de parallélisme de fabrication?

Les deux tolérances d'orientations recherchées ci-dessus sont très importantes car elles permettent d'obtenir la tolérance de perpendicularité dictée dans le dessin de définition:



Le tracé de la chaîne des orientations permet de répondre aux deux questions. A la figure 9.14, J, la condition "fonctionnelle", est la condition fonctionnelle à remplacer. La perpendicularité P s'applique à la sous-phase # 1 tandis que le parallélisme L est requis pour l'usinage de la sous-phase # 2.

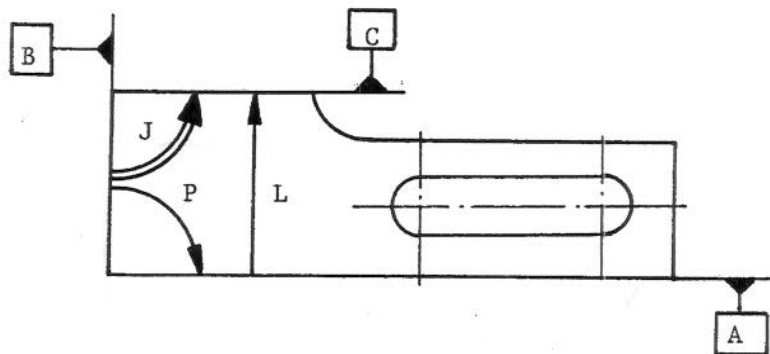


Figure 9.14: La chaîne des conditions géométriques. J est la condition fonctionnelle à remplacer.

Les équations d'interdépendance des tolérances s'applique également dans ce cas-ci:

$$\text{IT de J} = \text{IT de P} + \text{IT de L} \quad (6)$$

$$\text{(figure 9.11.b)} \quad 0.05 = ? + ?$$

Les tolérances ne peuvent pas être réparties tel quel car elles s'adressent à des surfaces de différentes longueurs. Elles seront comparatives si elles sont normalisées sur une longueur identique, par exemple 100 mm.

Le dessin de définition de la figure 9.11.b donne IT de J = 0.05 comme étant la perpendicularité de la face B par rapport à la face C. Si la face B avait 100 mm, cette tolérance deviendrait:

$$\text{IT de J} = 0.05 \text{ ou } \frac{0.05 \times 100}{17} \approx 0.3 \text{ formulé } 0.3/100$$

Revenons à l'équation (6). Les tolérances étant normalisées, 0.3/100 sera réparti équitablement entre P et L:

$$\begin{aligned} \text{IT de J} &= \text{IT de P} + \text{IT de L} \\ 0.3/100 &= 0.15/100 + 0.15/100 \end{aligned}$$

Remarquer que les deux nouvelles orientations à respecter sont plus exigeantes que l'orientation fonctionnelle de départ.

Maintenant, les dessins de phases # 1 et # 2 des figures 9.12 et 9.13 peuvent être complétés avec leur tolérance d'orientation de fabrication normalisée ou non comme suit:

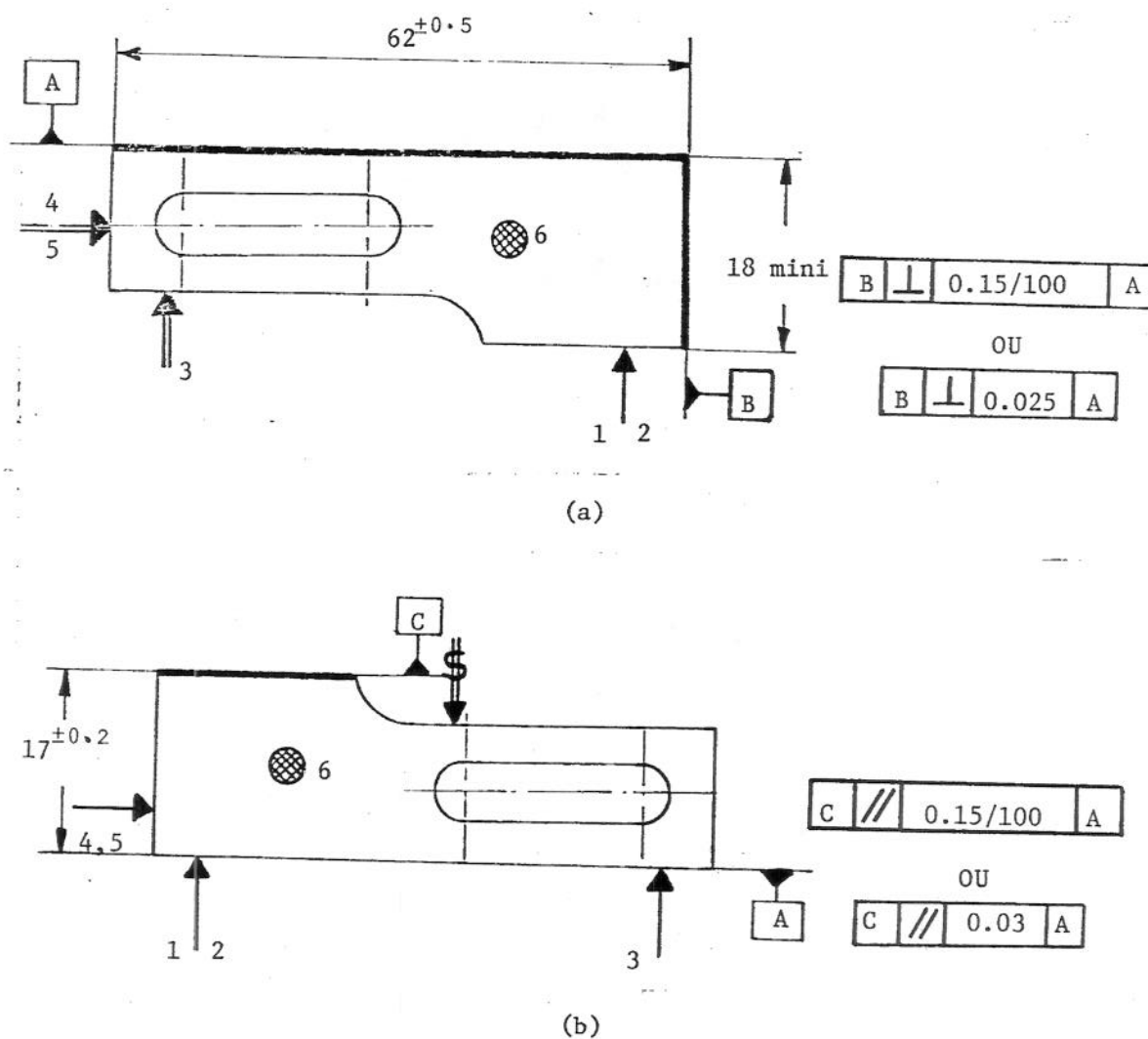


Figure 9.15: Croquis des phases (a) # 1 et (b) # 2 avec les tolérances d'orientation obtenues par transfert d'orientations.



## CHAPITRE X

### LA GAMME D'USINAGE

#### 10.1 Introduction

Le chapitre précédent a présenté les quatre principales étapes d'obtention d'un produit: la conception (bureau d'études), la préparation de la réalisation (bureau des méthodes), la fabrication et le contrôle. Ce chapitre va traiter une des tâches essentielles du bureau des méthodes soit la rédaction de la gamme d'usinage.

Le préparateur du bureau des méthodes rédige la gamme d'usinage c'est-à-dire qu'il établit en détails la séquence d'usinage du produit à fabriquer. Tout d'abord, il analyse ses données qui comprennent:

- le dessin de définition du produit à fabriquer. Le préparateur doit collaborer avec le bureau d'études afin de s'accorder sans ambiguïté aux exigences. Cette analyse est très importante car les indications fonctionnelles du plan (cotes, spécifications, états de surfaces, ...) expriment directement les conditions à l'emploi du produit fini.
- le programme de fabrication: quantité, délais, cadence de production, coût maximal alloué à la fabrication.
- la liste des moyens disponibles ou envisageables: parc de machines-outils, main-d'oeuvre qualifiée.

A partir de toutes ces données, le préparateur rédige la gamme d'usinage qui présente les différentes étapes chronologiques de la fabrication en détaillant le repérage isostatique, le serrage, la machine-outil, les outils, les profondeurs de passes d'ébauche et de finition, les vitesses et avances de coupe, ...

A travers un exemple, les étapes de l'établissement du processus d'usinage vont être présentées. La méthode de la matrice d'antécédence sera introduite pour déterminer de façon logique la séquence des différents usinages. Des remarques diverses seront également apportées sans toutefois pouvoir égaler l'expérience et le bon sens qui demeurent des atouts supplémentaires pour le préparateur appelé aussi gammiste.

## 10.2 Terminologie

Certains termes, employés tout au long de l'établissement de la gamme d'usinage, sont à définir:

Gamme d'usinage: Suite ordonnée des opérations nécessaires à l'exécution d'un travail, groupées en phases et sous-phases.

Passé d'usinage: Epaisseur de matière retirée de la pièce par l'unique passage d'un seul outil de coupe.

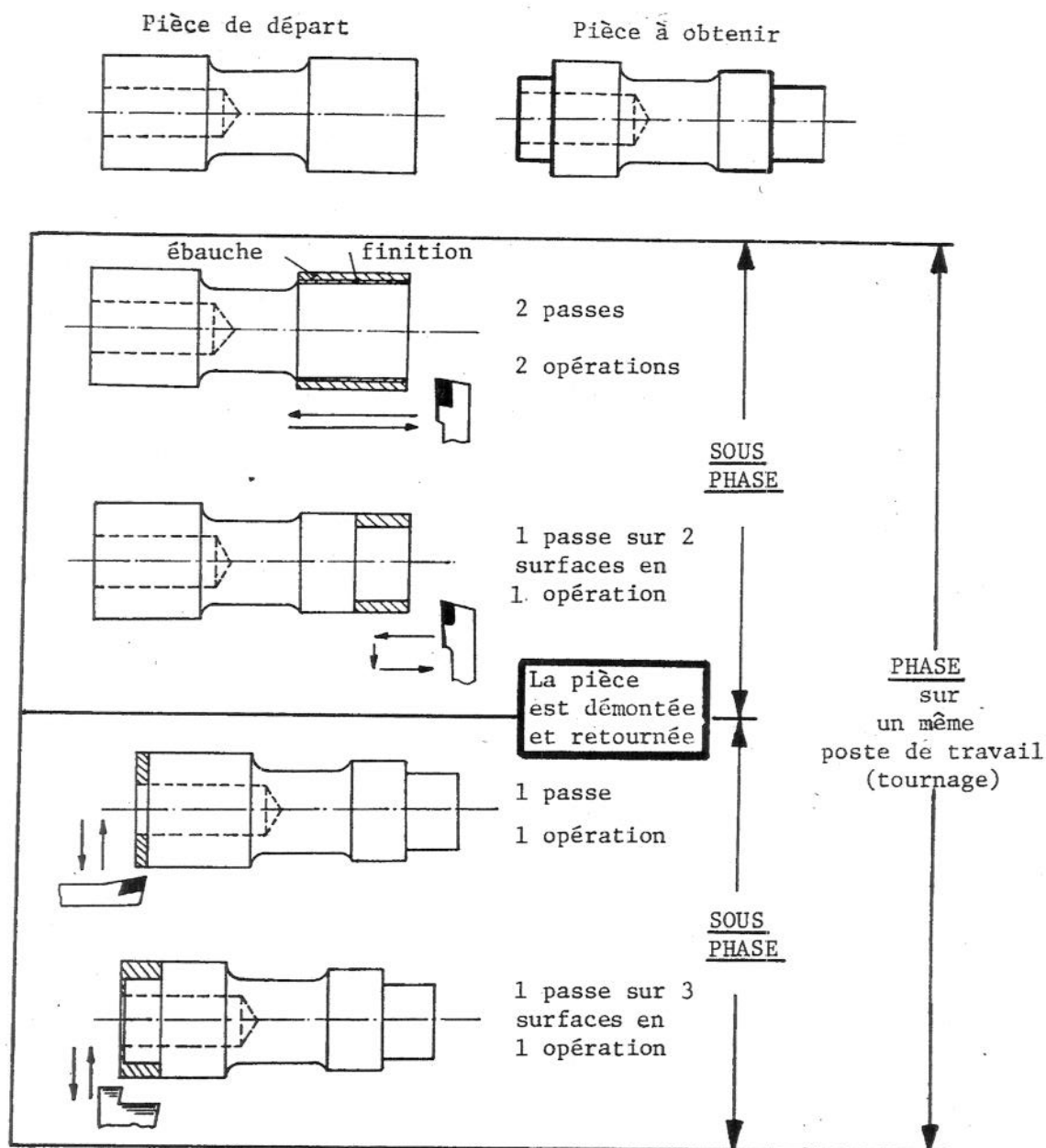
Phase: Ensemble ordonné d'opérations effectuées à un même poste de travail ou à une même machine avec ou sans démontage de la pièce. Par exemple, tous les travaux consécutifs réalisés sur une fraiseuse feront partie d'une phase même si le repérage isostatique de la pièce est changé.

Sous-phase: Fraction de la phase (sur une même machine) délimitée par un changement de repérages isostatiques.

Opération: Un cycle de un ou plusieurs outils groupés travaillant simultanément ou successivement. Plusieurs surfaces de la pièce peuvent être usinées durant une opération.

Poste de travail: Lieu de travail nécessaire à l'exécution d'une phase de travail est généralement la machine-outil (fraiseuse, rectifieuse cylindrique, ...).

A travers un exemple de tournage, la figure 10.1 clarifie les termes définis ci-dessus. Tous les usinages se font au tour. La pièce est usinée à partir de deux reprises c'est-à-dire deux différents repérages isostatiques.



**Figure 10.1:** Distinction entre les différents termes utilisés pour la rédaction d'une gamme d'usinage.

- \* La phase est sur un même poste de travail, ici le tour.
- \* La sous-phase. Un changement de sous-phase apparaît lorsque la pièce est démontée à l'intérieur d'une même phase.
- \* Les termes passes et opérations sont également explicités.

### 10.3 Elaboration de la gamme d'usinage: données générales

L'élaboration de la gamme d'usinage consiste à faire le lien entre les données générales de la fabrication et les données de la pièce à réaliser. Les données générales de la fabrication sont très vastes et font souvent appel à des compromis où l'expérience et le bon sens du gammiste sont nécessaires. La présente section introduit seulement les données générales essentielles.

#### 10.3.a La précision économique

La courbe de variation du coût relatif d'un usinage en fonction de son intervalle de tolérance (figure 10.2), montre qu'à partir d'un point  $P_e$  de cette courbe, le coût commence à augmenter rapidement pour un accroissement de qualité  $\Delta IT$ . Au contraire, si la qualité est diminuée du même  $\Delta IT$ , le coût est beaucoup moins affecté.

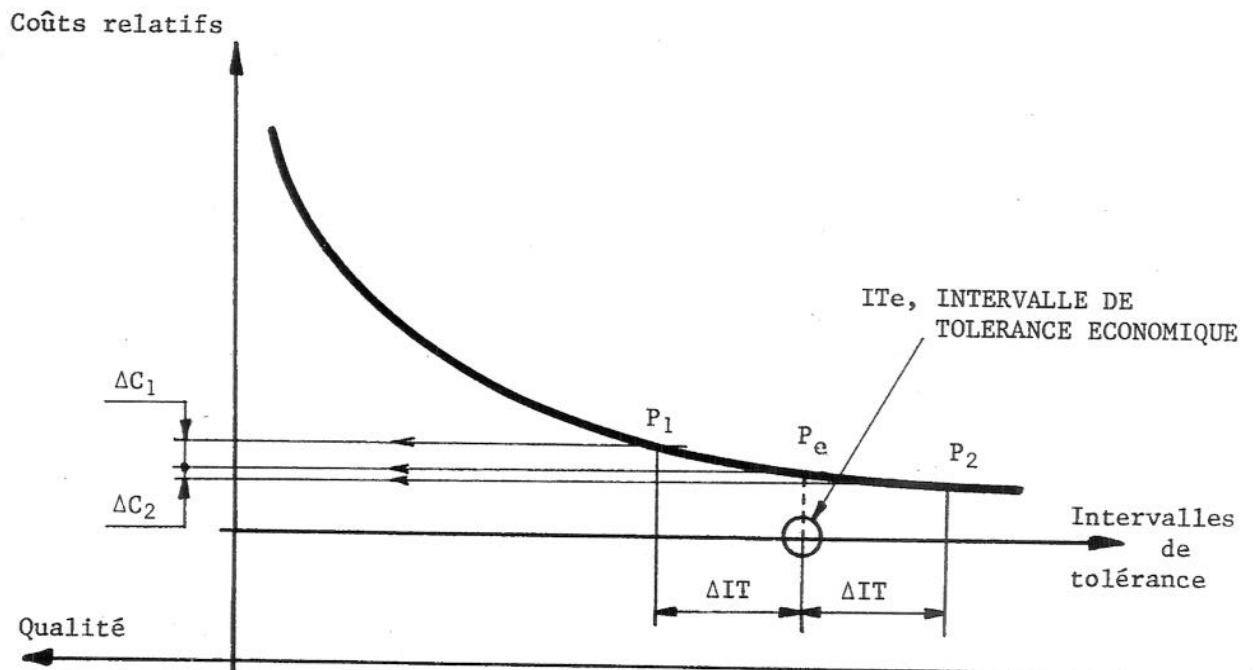


Figure 10.2: Coûts relatifs d'un usinage en fonction de l'intervalle de tolérance et de la qualité désirés. Le point  $P_e$  est le point économique.

L'intervalle de tolérance au point Pe est l'INTERVALLE DE TOLERANCE ECONOMIQUE. La figure 10.2 ne donne pas de valeur pour lTe car chaque procédé d'usinage possède sa propre courbe.

De façon identique, on peut définir l'ETAT DE SURFACE ECONOMIQUE. Ces deux éléments constituent la précision économique du procédé en question. Il est conseillé qu'une machine-outil travaille pour obtenir une majorité de cotes de qualité voisine de l'intervalle de tolérance économique. La même machine peut aussi réaliser, par des soins particuliers, des cotes de meilleure qualité si le bureau d'étude le demande; le coût de production sera alors plus élevé.

Le tableau 10.1 donne les intervalles de tolérances économiques moyens pour des cotes obtenues par différents procédés d'usinage.

| Procédés            | Ebauche | Demi-finition et finition |
|---------------------|---------|---------------------------|
| Fraisage - Tournage | 0.4     | 0.2                       |
| Alésage à l'alésoir | 0.2     | 0.1                       |
| Alésoir au grain    | 0.4     | 0.2                       |
| Perçage - Rabotage  | 0.4     | 0.2                       |
| Rectification       | 0.1     | 0.05                      |

Tableau 10.1: Les intervalles de tolérances économiques moyens en millimètres pour les différents procédés d'usinage. Rappelons que la machine est capable d'obtenir de meilleurs intervalles de tolérance, mais à coûts plus élevés.

### 10.3.b Les outils d'usinage

#### \* Le copeau minimal

Les sections 7.3.a et 7.4.a ont respectivement présenté les principes des outils de coupe tranchants et des meules abrasives. Ces outils sont sujets au phénomène de copeau minimal, c'est-à-dire que l'outil écrouit et refuse de couper lorsque l'épaisseur de matière est inférieur à l'épaisseur du copeau minimum. Les valeurs suggérées de copeau minimum sont les suivantes:

|                 |               |           |
|-----------------|---------------|-----------|
| outil tranchant | ébauche       | ≈ 0.5 mm. |
|                 | demi-finition | ≈ 0.3 mm. |
|                 | finition      | ≈ 0.2 mm. |
|                 | alésage       | ≈ 0.1 mm. |

Le gammiste doit respecter ces valeurs lors de la détermination des épaisseurs de passes de coupe.

\* Qualités et états de surface

Le tableau 10.2 donne les qualités et les états de surfaces moyens que divers matériaux d'usinage sont capables de fournir.

| Matériaux     | Ra (μm)   | Qualité |
|---------------|-----------|---------|
| Aciers rapide | 1.6 à 3.2 | 8 - 7   |
| Carbures      | 0.8 à 1.6 | 7       |
| Céramiques    | 0.4 à 0.8 | 6       |
| Meules        | 0.2 à 0.4 | 6 - 4   |

Tableau 10.2: Qualités et états de surface réalisables avec différents matériaux d'outils.

Lorsque les tolérances imposées sont encore plus faibles, que celles données dans le tableau 10.2, il faut envisager des procédés de superfinition tels que le rodage et le polissage qui utilisent de fins abrasifs analogues à ceux des meules.

Le gammiste doit considérer les données du tableau 10.2 lors du choix de ses outils. Il doit également s'assurer que la machine-outil choisie puisse réaliser des usinages à la qualité recherchée.

### \* L'usure des outils

Les trois étapes successives d'usure d'un outil de coupe sont montrées à la figure 10.3.

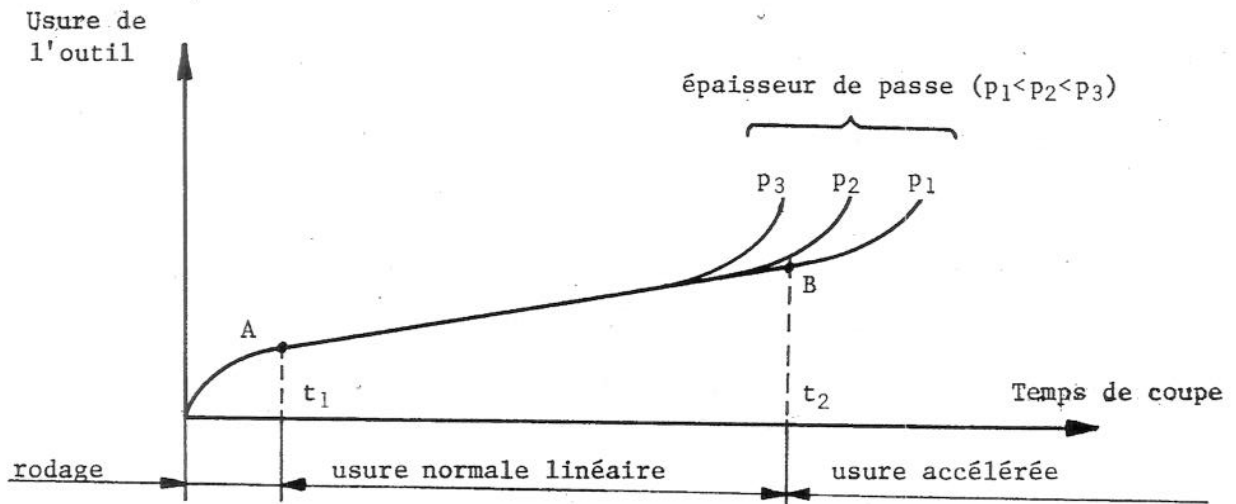


Figure 10.3: L'usure progressive d'un outil de coupe comprend trois étapes: le rodage, l'usure normale et l'usure accélérée ou faillite de l'outil.

- Le rodage: Etape très brève. L'arête tranchante de l'outil s'émousse, le rayon  $r$  se forme.
- L'usure normale quasi linéaire: Cette étape correspond à la vie active de l'outil. L'épaisseur du copeau minimal doit être respectée. L'usure de l'outil affecte les cotes outils et/ou machines; le diamètre d'un alésage diminue et celui d'un arbre augmente.
- L'usure accélérée: L'outil qui s'écaille ou se brise devient hors d'usage. L'outil doit être changé avant que cette faillite se produise.

La figure 10.3 montre l'effet de l'épaisseur de passe  $p$  sur la courbe d'usure. D'autres paramètres ont également un effet direct sur cette courbe: la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, les propriétés mécaniques du matériau de la pièce et l'usage d'un

lubrifiant ou non. En étude de production, l'influence de ces paramètres a été analysée et les courbes d'usure normalisées obtenues sont disponibles.

Le gammiste peut tenir compte des courbes d'usure normalisées des deux façons suivantes:

- 1- Prévoir le changement de l'outil avant la faillite au temps  $t_2$  montré à la figure 10.3. Un temps de sécurité doit être retranché à  $t_2$  afin de prévenir la faillite de l'outil. Des machines à commande numérique possèdent une option qui enregistre le temps de coupe total de chaque outil; la machine demande ainsi les changements d'outils aux temps opportuns.
- 2- Rattraper l'usure. Des machines à commande numérique possèdent une autre option qui consiste à corriger les déplacements de l'outil ou de la pièce de valeurs égales à l'usure graduelle de l'outil. Ces corrections sont intéressantes surtout lorsque la distance d'usure de l'outil est proche de l'intervalle de tolérance de la cote à obtenir.

#### 10.3.c Le parc des machines-outils

Le préparateur doit avoir à sa disposition la liste des machines-outils disponibles dans la compagnie avec leurs capacités dimensionnelles, de précision et de production. La gamme d'usinage doit autant que possible être adaptée à ce parc de machines-outils existant. Dans le cas où l'entreprise ne possède pas la ou les machines pertinentes à un usinage, le bureau des méthodes peut envisager deux alternatives: acquérir une ou de nouvelles machines ou sous-traiter l'usinage en question à l'extérieur.



\* Seuil de rentabilité d'une machine-outil

Les pièces mécaniques peuvent être appelées à être produites en:

- production unitaire ou quelques pièces  
(prototypes, montages spéciaux)
- production de série comprenant:
  - petite série (5 à 200 pièces)
  - moyenne série (200 à 1000 pièces)
  - grande série (1000 à 5000 pièces)
  - très grande série (plus de 5000 pièces)
- production par lots (ex: 50 pièces tous les deux mois)
- production continue en chaîne (ex: production automobile).

Dépendant de la quantité des pièces à produire, le gammiste va choisir une machine plus ou moins performante. Pour les petites séries, les machines conventionnelles, manuelles ou à butées conviennent alors que pour les moyenne et grandes séries, les machines automatisées sont plus adaptées. La figure 10.4 montre la courbe de rentabilité pour des travaux de tournage. Les tours vont du tour parallèle totalement manuel au tour à commande numérique. En abscisse sont indiqués les seuils de rentabilité de chacune des machines-outils.

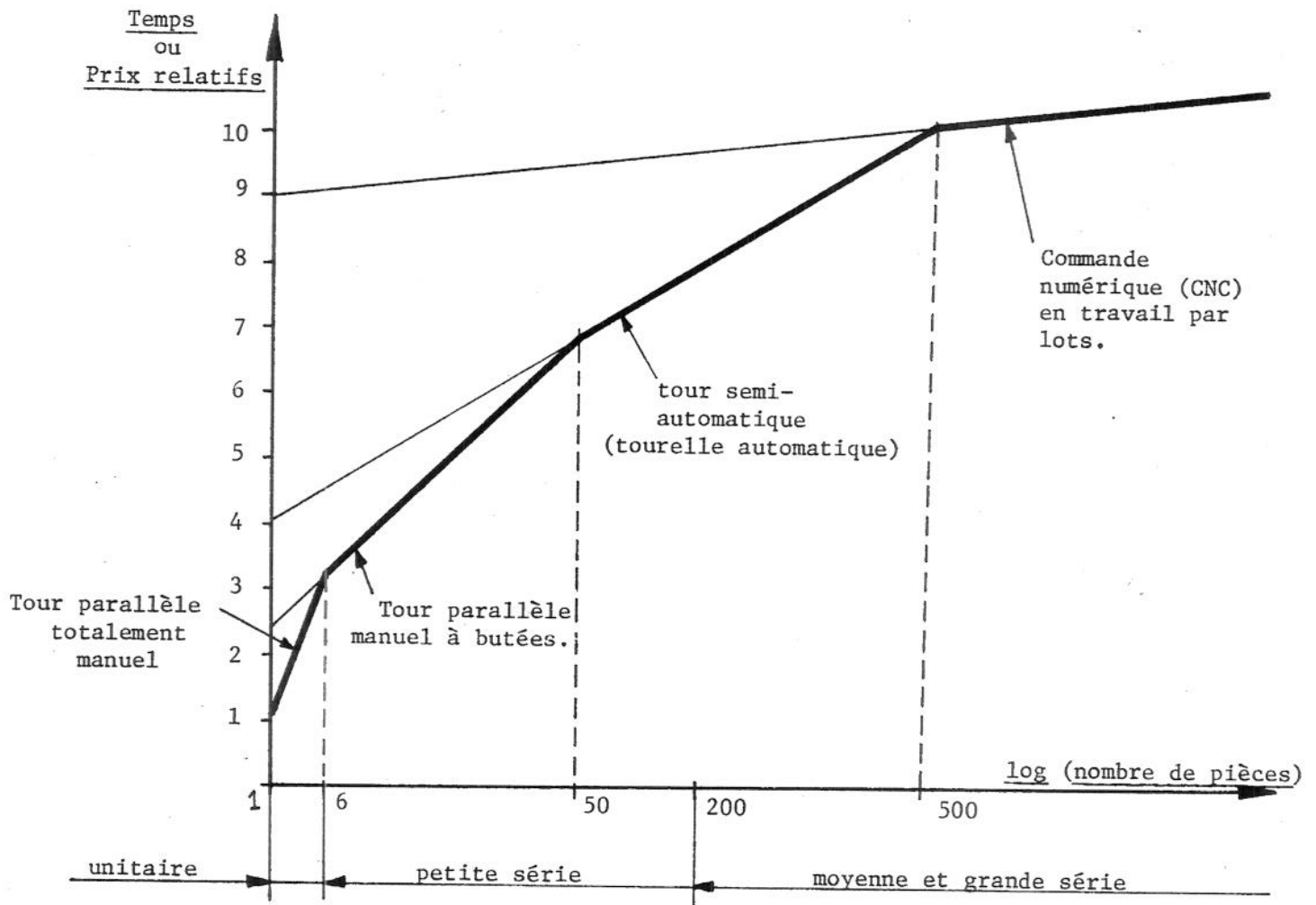


Figure 10.4: Courbe de rentabilité des différents tours pour des séries continues. Les investissements des machines-outils ne sont pas considérés sur ce graphe.

Le coût de production de la première pièce augmente avec l'automatisation de la machine. Sur le graphe, toutes les machines sont considérées comme travaillant sur une série continue (exemple, 150 ou 2000 pièces en un seul lot).

La commande numérique est un moyen de production flexible, il s'adapte très bien aux productions par lots à cause de la réutilisation possible de ses programmes. Le premier lot demande des préparatifs identiques à une série continue alors que les lots suivants sont plus rapidement lancés. Finalement, la commande numérique s'adapte aussi bien aux moyennes et grandes séries qu'aux séries par lots.

Pour les très grandes séries (exemple, production automobile), la machine transfert supprime les machines conventionnelles à commande numérique. La machine transfert peut être une fraiseuse à plusieurs têtes qui usine toujours les mêmes pièces durant plusieurs mois ou même années.

### \* Choix des machines-outils

Pour choisir une machine-outil, le préparateur doit avoir en présence d'esprit les points mentionnés ci-dessus mais également connaître les tables de qualité (tableau 10.3) et de rugosité (tableau 10.4) des procédés ou des machines-outils. Ces tables font référence aux rugosités et qualités de finition; l'ébauche de la pièce ne doit pas obligatoirement être réalisée sur la même machine.

| Procédé de fabrication         | Qualité |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------|---------|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
|                                | 4       | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Rodage et rectifiage           |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Meulage cylindrique            |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Perçage au diamant et tournage |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Meulage de surfaces planes     |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Équarrissage                   |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Alésage                        |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Tournage                       |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Perçage                        |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Forage                         |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Planage et façonnage           |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Fraisage                       |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Sciage                         |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |
| Cisaillage                     |         |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |

Tableau 10.3: Relation entre la qualité de l'intervalle de tolérance et les procédés de fabrication. Le tableau ne détaille pas le type de machine-outil.

| Rugosité $R_a$ en micromètres |                                       | 50                             | 25  | 12,5 | 6,3 | 3,2 | 1,6 | 0,8 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0,025 |      |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|------|
| RUGOSITÉ DE SURFACES BRUTES   | Estampage                             |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Forgeage                              |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Grenaillage                           |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Laminage                              | filage - extrusion à chaud     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | tréfilage - étirage à froid    |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Matriçage                             | à chaud                        |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | à froid                        |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Moulage                               | au sable                       |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | cire perdue - procédé Schaw... |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | en coquille, par gravité       |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
| Sablage                       |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
| RUGOSITÉ DE SURFACES USINÉES  | Alésage                               | outil acier rapide             |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | outil carbure ou diamant       |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | à l'alésoir                    |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Brochage                              |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Brunissage                            |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Découpage (à la presse)               |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Découpage fin (à la presse)           |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Électro-érosion                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Fraisage                              | outil acier rapide             |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | en bout                        |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Fraisage                              | outil acier rapide             |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | en roulant                     |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Galetage                              |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Grattage                              |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Limage (traits croisés ou parallèles) |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Meulage                               | à main                         |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | au disque                      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | électrolytique                 |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Mortaisage                            |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Oxycoupage                            |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Perçage au foret                      |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Polissage                             | mécanique                      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | électrolytique                 |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Rabotage                              |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Rectification                         | cylindrique                    |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | plane                          |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | diamant                        |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Rodage                                | à la pierre                    |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | au rodoir                      |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Sciage                                |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Superfinition                         |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Taillage                              | fraise module                  |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | fraise mère                    |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Tournage                              | outil acier rapide             |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       | outil carbure ou diamant       |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               | Rugosité $R$ en micromètres           |                                | 160 | 80   | 40  | 16  | 10  | 4   | 2   | 1   | 0,5 | 0,25 | 0,12  | 0,06 |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |
|                               |                                       |                                |     |      |     |     |     |     |     |     |     |      |       |      |

### 10.3.d Etude de la pièce brute

La fabrication de pièces en grande série impose la réalisation de produits de fonderie ou de forge. Le gamester doit posséder des informations au sujet de ces pièces: les intervalles de tolérance de ses cotes, sa rugosité et la surépaisseur de métal prévue pour les surfaces à usiner. Le Tableau 10.5 ci-dessous résume les informations données au chapitre # 6 (obtention de bruts).

| Procédé d'obtention du brut  | IT dimensionnel (mm.)   | Rugosité (Ra en $\mu\text{m}$ )                           | Surépaisseur (mm)  |
|--|---|---|--|
| Moulage {<br>en sable<br>en carapace<br>cire perdue<br>en coquille | $\begin{cases} 1 + 1.5d/100 \text{ (acier)} \\ 1.5 + 5d/1000 \text{ (aluminium)} \end{cases}$ | $\begin{matrix} 12.5 \\ 6.3 \text{ à } 12.5 \end{matrix}$ | $\begin{matrix} 4 \text{ à } 6 \\ 4 \text{ à } 6 \end{matrix}$ |
|  | $0.4 + d/100$   | 6.3   | 4  |
|  | $0.25 + 5d/1000$  | 6.3   | 2 à 4  |
|  | $0.3 + 3d/1000$   | 6.3 à 3.2   | 2 à 4  |
| Matriçage - Estampage  | $1 + d/100$   | 12.5  | 2 à 3  |
| Filage   | $0.5 + 8d/1000$   | 3.2   | 1 à 2  |
| Laminage   | $0.7 + 2d/100$  | 12.5  | 3 à 6  |
| Etirage  | qualités 10 à 9   | 3.2 à 1.6   | 1  |

Tableau 10.5: Caractéristiques moyennes des pièces brutes. L'intervalle de tolérance (IT) dimensionnel est donné en fonction de d, la dimension considérée. Ces données ne sont valables que pour d inférieur à 350 mm.

Des outils de coupe robustes sont à prévoir pour ébaucher les surfaces de pièces brutes provenant de moulage car des particules de silice sont incluses en surface.

#### \* Le balancement du brut

Tout travail sur une pièce brute débute par l'usinage de surfaces brutes; la pièce étant positionnée isostatiquement par rapport à d'autres surfaces brutes. Le balancement du brut est important car il signifie que la pièce usinée, terminée, soit contenue à l'intérieur du volume brut tout en gardant les surépaisseurs d'usinage minimales. Généralement le bureau d'études donne les cotes et les spécifications de liaison au brut permettant le balancement. Ces liaisons au brut doivent être considérées en priorité lors d'une étude de fabrication car elles donnent de précieux indices pour le choix du premier repérage isostatique. Un exemple est donné à la figure 10.5.

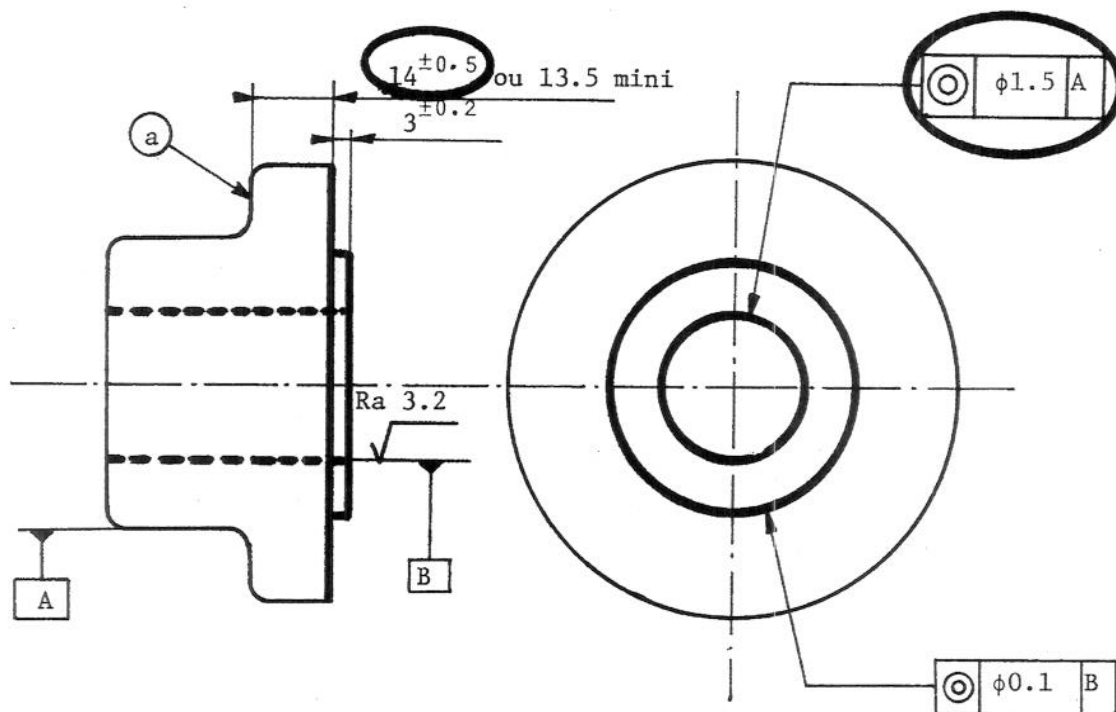


Figure 10.5: Les surfaces tracées en trait fort sont à usiner à partir d'une pièce brute. Les cotes et spécifications de liaison au brut sont encadrées.

Les usinages à réaliser sont tracés en trait fort, les autres surfaces sont brutes. Les deux cotations liaisons au brut sont encerclées; elles dictent le repérage isostatique nécessaire soit: un appui plan sur la face a et un centrage court sur le cylindre A. Noter que la cote de liaison à la surface a peut être donnée de deux façons différentes:

- cote tolérancée ( $14^{+0.5}$ )
- cote unilimite (13.5 mini), le bureau des méthodes respecte cette limite inférieure et choisit alors un intervalle de tolérance répondant à la précision économique (exemple:  $13.5^{+0.8}_0$ )

#### 10.3.e Ebauche - Demi-finition - Finition

L'ébauche (E) est une opération qui permet d'enlever le maximum de matière en approchant la cote à atteindre. Plusieurs passes d'ébauche peuvent être nécessaires.

La demi-finition (F/2) est l'opération qui permet d'obtenir la précision géométrique et la forme de la surface.

La finition (F) permet d'obtenir la dimension tolérancée de la surface ainsi que l'état de surface.

La finition spéciale (FS) permet d'atteindre des intervalles de tolérance serrés et d'excellents états de surface par rodage, pierrage ou grattage.

Remarque importante: Un outil à arêtes multiples (fraises) peut réaliser toutes les passes prévues alors que l'outil à une seule arête doit être changé pour la passe de finition, tout au moins pour les qualités 8, 7, 6.



L'état de surface et la qualité recherchés sont les spécifications du bureau d'études qui permettent de juger quelles opérations parmi l'ébauche, la demi-finition, la finition sont à réaliser. Le tableau 10.6 résume l'interprétation de ces spécifications.

| Rugosités           | Qualités                | Etapes d'usinage                      |
|---------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| $Ra \geq 6.3 \mu m$ | 10 à 13<br>et au-dessus | Finition directe                      |
| $Ra < 6.3 \mu m$    | 8 à 9                   | Ebauche + Finition                    |
|                     | 6 à 7                   | Ebauche + Demi-finition +<br>Finition |

Tableau 10.6: Nécessité de l'ébauche, de la demi-finition et de la finition en fonction des rugosités et des qualités dictées par le bureau d'études.

Si une surface requiert les trois étapes successives d'usinage: ébauche (E), demi-finition (F/2) et finition (F), ces trois usinages ne seront pas forcément réalisés sur la même machine. C'est le cas de tous les travaux de finition par rectification (plane ou cylindrique) qui sont précédés par des usinages à l'outils de coupe (tournage ou fraisage).

#### 10.4 Lecture du dessin de définition

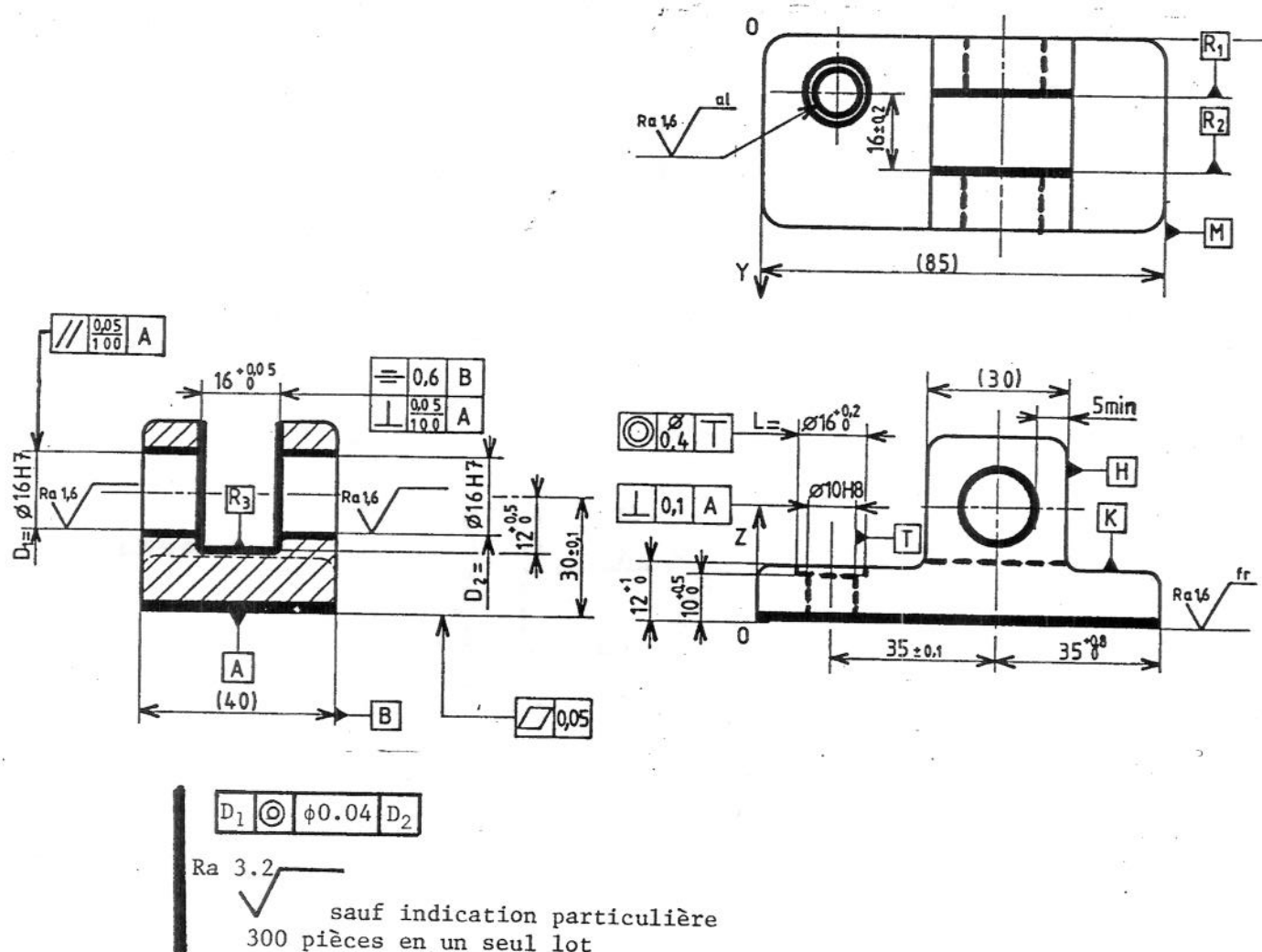
La lecture et l'interprétation du dessin de définition sont basées sur les indications fonctionnelles qui expriment directement les conditions à l'emploi du produit fini. Cette analyse ne doit présenter aucune ambiguïté. Si le gammiste découvre des points obscurs ou suggère des simplifications, il doit consulter le bureau d'études. La présente section énumère les principales étapes utiles à l'interprétation du dessin de définition en vue de la rédaction de la gamme d'usinage.

- 1 - Découvrir attentivement la forme de la pièce: les surfaces à usiner, les surfaces demeurant brutes, les portions peu rigides risquant de fléchir au serrage ou à l'usinage.
- 2 - Découvrir les cotations dimensionnelles et de position du dessin de définition. Encercler les cotes possédant les plus étroits intervalles de tolérance (grande qualité); ces cotes nécessiteront un soin tout particulier.
- 3 - Identifier les rugosités de surface demandant une finition ou une rectification (voir le tableau 10.4).
- 4- A partir des cotes de liaison au brut et de la forme de la pièce, rechercher la ou les surfaces de départ. La surface de départ est la surface qui doit être usinée lors de la première phase et qui fera office de référence pour les usinages subséquents. Cette surface doit autant que possible avoir une grande superficie; cela permet de choisir les repérages isostatiques suivants avec une bonne stabilité.
- 5- Si plusieurs cotes de liaison au brut existent suivant la même direction, retenir la cote avec le plus petit intervalle de tolérance.
- 6- Détecter les surfaces associées, ce sont les surfaces qu'il est généralement utile de grouper dans la même opération, ou la même sous-phase (rainure, trou étagé, où un seul passage d'outil dresse plusieurs surfaces). Les associations de surfaces sont nécessaires pour satisfaire plus sûrement les spécifications et/ou pour réduire économiquement le nombre de sous-phases et ainsi le temps d'usinage.
- 7- Détecter les lourdes ébauches car celles-ci devront, autant que possible, être réalisées en premier lieu à cause des gros efforts de coupe qui risquent de faire vibrer ou déstabiliser la pièce sur ses liaisons.
- 8- Commencer à étudier les contraintes d'antériorité c'est-à-dire, à partir de la cotation, trouver les usinages qui devront être réalisés avant d'autres. La section suivante analyse ces contraintes d'antériorité à l'aide d'un tableau.

## 10.5 Analyse des antériorités

L'analyse des antériorités permet le choix de la séquence des opérations d'usinage. Ce choix est important car il permet, à travers la gamme d'usinage, de réaliser des pièces correctes en minimisant les opérations à réaliser et les machines-outils à utiliser. Deux méthodes permettent d'approcher cette séquence: la méthode du polygone de liaison des surfaces et la méthode de la matrice d'antécédence. Seule la dernière méthode sera développée dans cette section à travers un exemple.

Soit la pièce de la figure 10.6 dont les surfaces tracées en trait fort sont à usiner conformément à la cotation fonctionnelle. La pièce brute, en fonte ASTM 25, vient de fonderie sans ouverture des cavités de la rainure R et de l'alésage D.



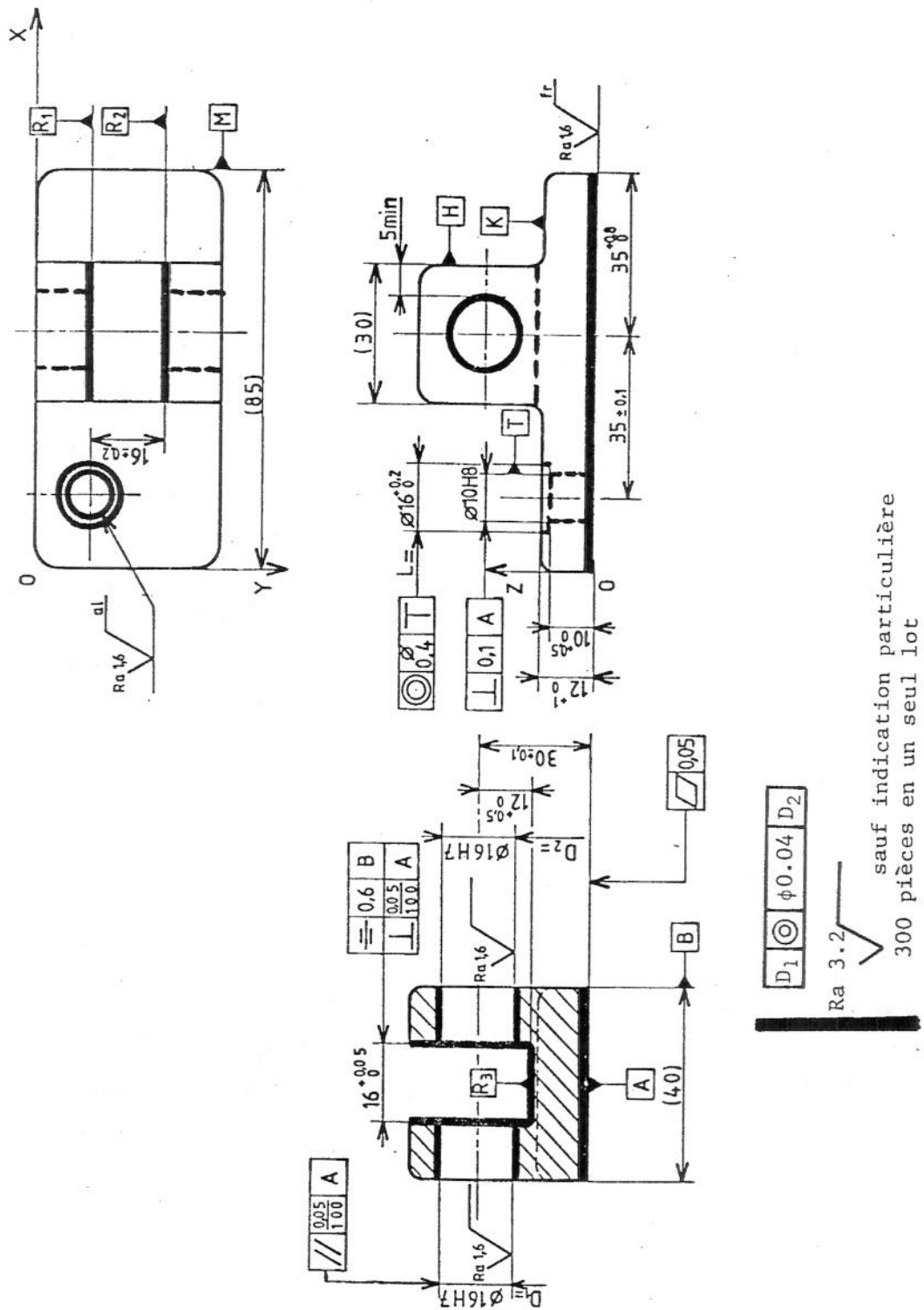


Figure 10.6: CHAPE - SUPPORT. Exemple d'analyse des antériorités. Les cotes entre parenthèses sont des cotes de brut.

a) Lecture et interprétation du dessin de définition (figure 10.6)

Nous allons reprendre les sept premières étapes de base présentées à la section précédente.

1- Lecture du dessin: Les traits forts montrent assez bien quelles sont les surfaces à usiner. Dans ce cas, la forme de la pièce est simple.

2- Cotation du dessin:

qualités requierrant du soin:

- largeur de la rainure R:  $16 \begin{smallmatrix} +0.05 \\ 0 \end{smallmatrix}$
- perpendicularité de la rainure R avec la surface de base A: 0.05/100
- diamètre des alésages D:  $\phi 16 H7$
- parallélisme des alésages D avec la surface de A: 0.05/100.
- diamètre de trou T:  $\phi 10 H8$

qualités économiques:

- axe de D avec la base A:  $30 \begin{smallmatrix} \pm 0.1 \end{smallmatrix}$
- fond de la rainure R avec l'axe de D:  $12 \begin{smallmatrix} +0.5 \\ 0 \end{smallmatrix}$
- localisation du trou T par rapport à la rainure:  $16 \begin{smallmatrix} \pm 0.2 \end{smallmatrix}$
- localisation du trou T par rapport à l'alésage D:  $35 \begin{smallmatrix} \pm 0.1 \end{smallmatrix}$

3- Les états de surface: Sauf indications particulières, la rugosité demandée est  $Ra = 3.2 \mu m$ . Un tel état de surface peut être facilement obtenu en fraisage ou en tournage avec des outils en carbure, voir tableau 10.4.

Les alésages D et le trou T demandent un  $Ra$  de  $1.6 \mu m$ . Cette rugosité est la valeur moyenne d'un usinage à l'alésoir (tableau 10.4).

N'ayant pas de rugosités de 0.8 et  $0.4 \mu m$  demandées, aucune rectification n'est requise.

4- Cotation de liaison au brut: Surface de départ.

- la face A avec la face brute K:  $12 \begin{smallmatrix} +1 \\ 0 \end{smallmatrix}$
- le bord de l'alésage D avec la face latérale  
H: 5 min
- la rainure R est symétrique à  $t_{max} = 0.6 mm$ . avec la largeur B.

Il n'y a pas d'équivoque dans ce cas, en prenant appui sur la face brute K, la face A peut être usinée. Cette face A, de grande superficie, pourra faire office de surface de départ; beaucoup de cotes y font référence.

- 5- Conflit de cotes de liaison au brut. Deux cotes localisent latéralement l'alésage D par rapport au brut: les cotes 5 min et  $35^{+0.8}_0$ . Cela signifie que ces deux cotes devraient être respectées ensemble. Il se peut qu'à cause de la dispersion des dimensions des bruts, ces deux cotes ne puissent pas être respectées sur certaines mêmes pièces. Pour ces cas-là, il faut discuter avec le bureau d'études quelle cote choisir prioritaire. Ici, il semble que la cote 5 min soit prioritaire car elle détermine la position latérale du trou par rapport à la cote de brut 30.
- 6- Les surfaces associées: Rappelons que les surfaces associées sont les surfaces qui peuvent être usinées lors d'un seul passage d'outil. Les surfaces  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$  sont associées lors de la réalisation (fraise 3 tailles extensible, figure 7.49) et font partie du groupement R. Les alésages  $D_1$  et  $D_2$  font partie du groupement D (condition de concentricité,  $\phi 0.04$ ).  $D_1$  et  $D_2$  seront usinés comme un seul alésage.
- 7- Lourdes ébauches: Les cavités de la rainure R et de l'alésage D ne sont pas ouvertes de fonderie; cela demande de grosses ébauches. Il serait préférable d'ébaucher R et D avant d'aborder leur demi-finition et finition, les ébauches créant toujours des vibrations à la pièce.

A cause des qualités de positionnement requises pour R et D (0.05/100, H7) et de leurs lourdes ébauches, ébauche, demi-finition et finition s'imposent.

b) La matrice d'antécédence

Le tableau 10.7 est une matrice carrée comportant autant de lignes et de colonnes que d'opérations élémentaires. Ces opérations sont portées en entrée et sortie. Les surfaces brutes de liaison de départ sont incluses dans le tableau. Les surfaces associées sont représentées par leur groupement, R et D.

\* Introduction des données (tableau 10.7)

La colonne sortie se rapporte aux usinages considérés

La colonne entrée se rapporte aux usinages précédents l'usinage considéré

Indiquer le chiffre 1 lorsqu'il y a antécédence d'une opération d'entrée par rapport à une autre opération de sortie. Commentaires relatifs à l'exemple de la figure 10.6:

- La face A, terminée, est une antécédence à l'usinage de toutes les autres surfaces
- Le trou T est antécédent au lamage L.
- L'ébauche de l'alésage D sera antécédent à l'usinage complet de la rainure R. Dans le tableau, ceci s'inscrit par trois 1 dans la colonne D(E) face à R(E), R(F/2) et R(F).

\* Lecture des niveaux d'usinage (tableau 10.7)

- 1- Totaliser toutes les lignes et inscrire le total dans la colonne "Total". Les totaux nuls correspondent aux surfaces brutes K, B, H.
- 2- Retotaliser toutes les lignes en ignorant les inscriptions des colonnes K, B, H qui sont les colonnes correspondant aux zéros de la somme précédente. Inscrire les nouveaux totaux dans la colonne "Niveau 1". Les zéros qui apparaissent dans cette colonne correspondent aux usinages de niveau 1. A(E), A(F/2) et A(F) sont donc les usinages de niveau 1 à cause des zéros correspondants.
- 3- Répéter les sommes suivant les lignes en ignorant toutes les colonnes des usinages ayant obtenus zéro aux sommes précédentes. C'est ainsi que six niveaux d'usinage sont découverts.

| ENTREES (usines précédents) |   |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            | T<br>O<br>T<br>A<br>L |            | Niveaux<br>d'usage |   |   |   |   |   |
|-----------------------------|---|---|---|----------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|-----------------------|------------|--------------------|---|---|---|---|---|
|                             | K | B | H | A<br>(E) | A<br>(F/2) | A<br>(F) | D<br>(E) | D<br>(F/2) | D<br>(F) | R<br>(E) | R<br>(F/2) | R<br>(F) | T<br>(E) | T<br>(F/2) | T<br>(F)              | L<br>(E.F) | 1                  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| K                           |   |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 0                  |   |   |   |   |   |
| B                           |   |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 0                  |   |   |   |   |   |
| H                           |   |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 0                  |   |   |   |   |   |
| A(E)                        | 1 |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 1                  | 0 |   |   |   |   |
| A(F/2)                      | 1 |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 1                  | 0 |   |   |   |   |
| A(F)                        | 1 |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 1                  | 0 |   |   |   |   |
| D(E)                        |   | 1 |   |          |            | 1        |          |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 2                  | 1 | 0 |   |   |   |
| D(F/2)                      |   | 1 |   |          |            | 1        |          |            |          | 1        |            |          |          |            |                       |            | 3                  | 2 | 1 | 1 | 0 |   |
| D(F)                        |   | 1 |   |          |            | 1        |          |            |          | 1        |            |          |          |            |                       |            | 3                  | 2 | 1 | 1 | 0 |   |
| R(E)                        | 1 |   |   |          |            | 1        | 1        |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 3                  | 2 | 1 | 0 |   |   |
| R(F/2)                      | 1 |   |   |          |            | 1        | 1        |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 3                  | 2 | 1 | 0 |   |   |
| R(F)                        | 1 |   |   |          |            | 1        | 1        |            |          |          |            |          |          |            |                       |            | 3                  | 2 | 1 | 0 |   |   |
| T(E)                        |   |   |   |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            |                       |            | 3                  | 2 | 1 | 0 |   |   |
| T(F/2)                      |   |   |   |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            |                       |            | 3                  | 3 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| T(F)                        |   |   |   |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            |                       |            | 3                  | 3 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| L(E.F)                      |   |   |   |          |            | 1        |          |            |          |          |            |          |          |            | 1                     |            | 2                  | 2 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Tableau 10.7: MATRICE D'ANTECEDENCE. La matrice est carrée, les entrées (colonnes) et les sorties (lignes) correspondent aux mêmes opérations d'usage. Un 1 signifie que l'opération entrée doit précéder l'opération sortie.



| ENTREES (usines précédents) |   |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |          |            | T<br>O<br>T<br>A<br>L |   | Niveaux<br>d'usinage |   |   |   |  |  |
|-----------------------------|---|---|---|----------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|------------|-----------------------|---|----------------------|---|---|---|--|--|
|                             | K | B | H | A<br>(E) | A<br>(F/2) | A<br>(F) | D<br>(E) | D<br>(F/2) | D<br>(F) | R<br>(E) | R<br>(F/2) | R<br>(F) | T<br>(E) | T<br>(F/2) | T<br>(F) | L<br>(E.F) | 1                     | 2 | 3                    | 4 | 5 | 6 |  |  |
| K                           |   |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 0                     |   |                      |   |   |   |  |  |
| B                           |   |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 0                     |   |                      |   |   |   |  |  |
| H                           |   |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 0                     |   |                      |   |   |   |  |  |
| A(E)                        | 1 |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 1                     | 0 |                      |   |   |   |  |  |
| A(F/2)                      | 1 |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 1                     | 0 |                      |   |   |   |  |  |
| A(F)                        | 1 |   |   |          |            |          |          |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 1                     | 0 |                      |   |   |   |  |  |
| D(E)                        |   |   | 1 |          |            | 1        |          |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 2                     | 1 | 0                    |   |   |   |  |  |
| D(F/2)                      |   |   | 1 |          |            | 1        |          |            |          | 1        |            |          |          |            |          |            | 3                     | 2 | 1                    | 1 | 0 |   |  |  |
| D(F)                        |   |   | 1 |          |            | 1        |          |            |          | 1        |            |          |          |            |          |            | 3                     | 2 | 1                    | 1 | 0 |   |  |  |
| R(E)                        |   | 1 |   |          |            | 1        | 1        |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 3                     | 2 | 1                    | 0 |   |   |  |  |
| R(F/2)                      |   | 1 |   |          |            | 1        | 1        |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 3                     | 2 | 1                    | 0 |   |   |  |  |
| R(F)                        |   | 1 |   |          |            | 1        | 1        |            |          |          |            |          |          |            |          |            | 3                     | 2 | 1                    | 0 |   |   |  |  |
| T(E)                        |   |   |   |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            |          |            | 3                     | 3 | 2                    | 2 | 1 | 0 |  |  |
| T(F/2)                      |   |   |   |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            |          |            | 3                     | 3 | 2                    | 2 | 1 | 0 |  |  |
| T(F)                        |   |   |   |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            | 1        |          |            |          |            | 3                     | 3 | 2                    | 2 | 1 | 0 |  |  |
| L(E.F)                      |   |   |   |          |            | 1        |          |            |          |          |            |          |          |            | 1        |            | 2                     | 2 | 1                    | 1 | 1 | 0 |  |  |

Tableau 10.7: MATRICE D'ANTECEDENCE. La matrice est carrée, les entrées (colonnes) et les sorties (lignes) correspondent aux mêmes opérations d'usinage. Un 1 signifie que l'opération entrée doit précéder l'opération sortie.

4- Niveau # 1:  $A(E)$ ,  $A(F/2)$ ,  $A(F)$

Niveau # 2:  $D(E)$

Niveau # 3:  $R(E)$ ,  $R(F/2)$ ,  $R(F)$

Niveau # 4:  $D(F/2)$ ,  $D(F)$

Niveau # 5:  $T(E)$ ,  $T(F/2)$ ,  $T(F)$

Niveau # 6:  $L(F)$

- 5- L'étude des niveaux peut révéler que certains niveaux peuvent être regroupés si par exemple la pièce n'est pas démontée de la machine entre deux niveaux consécutifs. C'est le cas entre les niveaux # 5 et # 6 où un seul changement d'outils est nécessaire entre le perçage et leamage.

c) Le graphique d'enchaînement

La séquence des opérations d'usinage telle que déduite de la matrice d'antécédence peut être présentée sous forme graphique tel que montré à la figure 10.7.

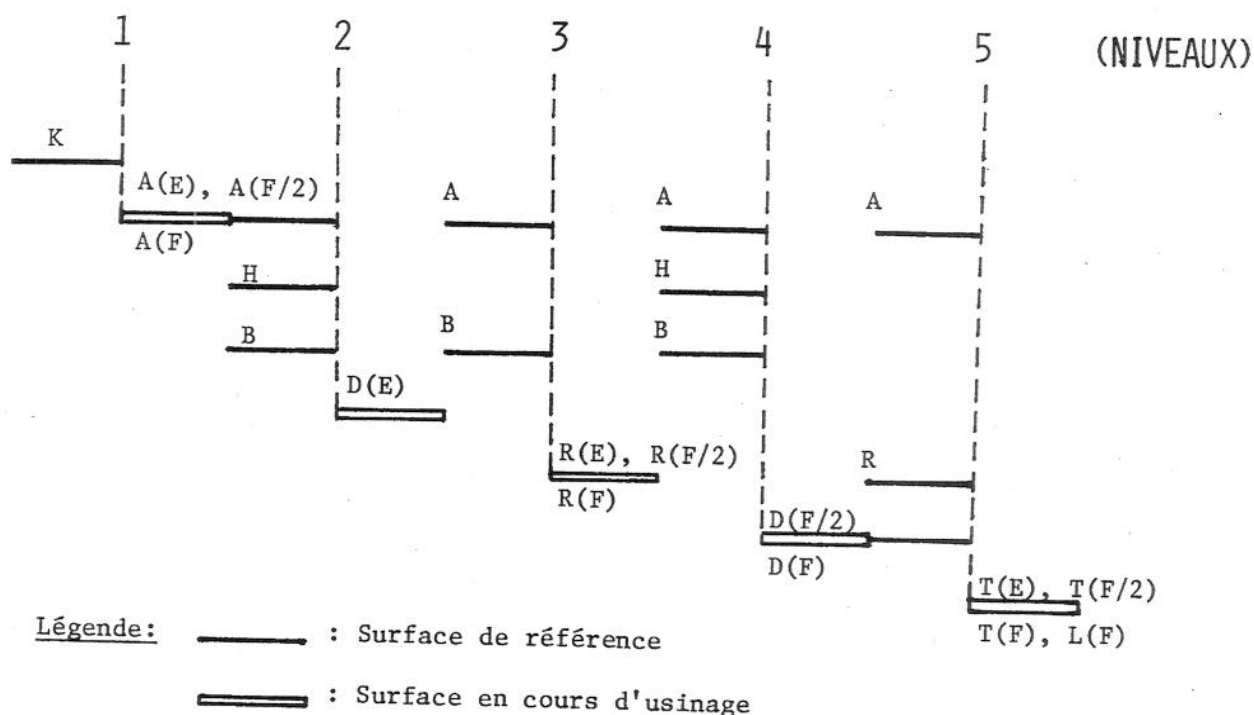


Figure 10.7: Graphique d'enchaînement pour l'usinage de la pièce de la figure 10.6. La séquence des niveaux est déduite de la matrice d'antécédence du tableau 10.7.

## 10.6 Rédaction de la gamme d'usinage

La séquence d'usinage peut maintenant être rédigée avec tous les détails complémentaires aux usinages: machines-outils, repérage isostatique avec le type de liaisons, serrage, outils, transferts de cotes si nécessaires.

La gamme comprendra au moins un croquis par phase. Les phases seront numérotées par des dizaines, 10, 20, 30 et les sous-phases par des nombres pairs (exemple, les deux sous-phases de la phase 40 seraient numérotées 42 et 44). Les feuilles de gamme d'usinage comprennent cinq colonnes:

- numéro de phase ou sous-phase
- machine-outil choisie
- description de la phase ou de la sous-phase
- croquis de phase avec les usinages tracés en trait fort.  
Ces croquis indiquent le repérage isostatique, le serrage et les cotes de fabrication (Cm, Co, Ca).
- besoin d'un transfert de cotes si des cotes de fabrication ne sont pas des cotes de définition. Les calculs du transfert de cotes sont reportés à la fin de la gamme (en annexe).

Deux gammes d'usinage différentes vont être présentées, l'une sera adaptée aux machines-outils conventionnelles (fraiseuse, tour, perceuse) tandis que l'autre conviendra plutôt à un centre d'usinage avec options possibles de quatrième et cinquième axes.

### 10.6.a Gamme d'usinage avec des machines-outils conventionnelles

GAMME D'USINAGE

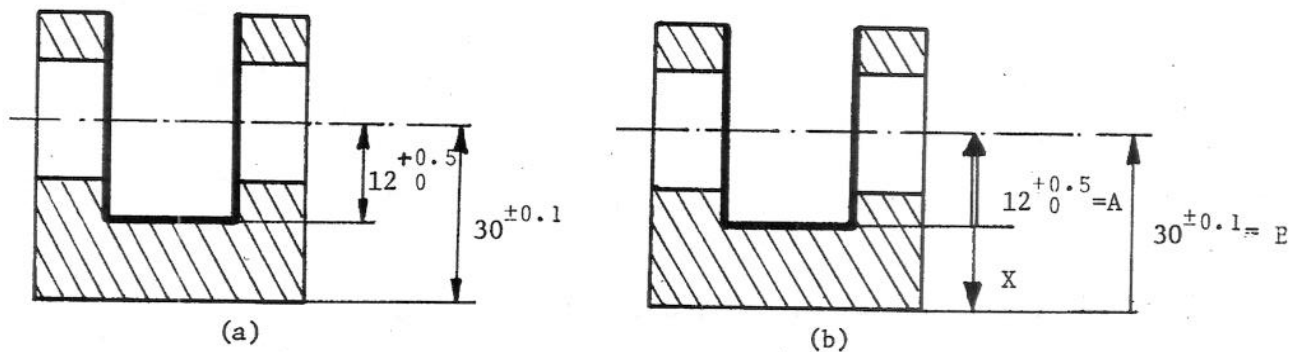
Feuille 1/2

| PH. | M.O. | DESCRIPTION  | CROQUIS | T.C. |
|-----|------|--|---------|------|
| 10  | F.V. | <p><u>FRAISEUSE VERTICALE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ebauche, demi-finition et finition de la surface A</li> <li>- <u>Repérage isostatique</u>:<br/>Appui-plan sur K<br/>Appui ligne sur B<br/>Butée axiale</li> <li>- Le serrage est opposé aux appuis 4 et 5</li> <li>- <u>Outil</u>: Fraise à surfacer avec outils en acier rapide</li> </ul>                   |         | non  |
| 20  | P.C. | <p><u>PERCEUSE A COLONNE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ebauche de l'alésage D</li> <li>- <u>Repérage isostatique</u>:<br/>Appui plan en A<br/>Appui ligne en B<br/>Butée axiale en H</li> <li>- Le serrage est opposé à la face A</li> <li>- <u>Outils</u>: Foret à centrer<br/>Forêts <math>\phi</math> 7 et 14 mm.</li> </ul>                                       |         | non  |
| 30  | F.H. | <p><u>FRAISEUSE HORIZONTALE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ebauche, demi-finition et finition de la rainure R</li> <li>- <u>Repérage isostatique</u>:<br/>Appui plan en A<br/>Appui ligne en B<br/>Butée axiale</li> <li>- Le serrage est opposé à la face A</li> <li>- <u>Outils</u>. Deux fraises 3 tailles largeurs 10, 15 et 16, 3 tailles extensibles.</li> </ul> |         | oui  |

| GAMME D'USINAGE |      |   | Feuille 2/2 |      |
|-----------------|------|---|-------------|------|
| PH.             | M.O. | DESCRIPTION   | CROQUIS     | T.C. |
| 40<br>42        | P.C. | <p><u>PERCEUSE A COLONNE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Demi-finition et finition de l'alésage D</li> <li>- Repérage isostatique et serrage identiques à celui de la phase 20</li> <li>- Outils:<br/> <u>Demi-finition:</u> Grain pour alésage à <math>\phi</math> 15.7 mm<br/> <u>Finition:</u> Alésoir <math>\phi</math> 16 H7</li> </ul>   |             | non  |
| 44              |      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Usinages:<br/>           Trou T<br/>           Lamage L</li> <li>- Repérage isostatique:<br/>           Appui plan sur A<br/>           Appui ligne sur la face R<sub>2</sub> de la rainure<br/>           Locating 6</li> <li>- Serrage opposé aux appuis 4 et 5 et incliné pour assuré contact de A sur ses appuis.</li> <li>- Outil<br/> <u>Trou T:</u> Foret à centrer<br/>           Forets <math>\phi</math> 6 et <math>\phi</math> 9.7<br/>           Alésoir <math>\phi</math> 10 H8<br/> <u>Lamage L:</u> Outil à lamer <math>\phi</math> 16 avec pilote <math>\phi</math> 10.</li> </ul> |             | non  |
| 50              |      | EBAVURAGE   |             |      |
| 60              |      | CONTROLE  |             |      |

### Calcul du transfert de cotes de la phase 30

La figure 10.8 montre la cotation fonctionnelle de l'usinage de la phase 30 ainsi que la chaîne de cotes nécessaire en transfert.



**Figure 10.8** (a) Cotation fonctionnelle fournie avec le dessin  
(b) Tracé de la chaîne de cotes. X est la cote de fabrication à calculer.

X est la cote de fabrication à calculer. Etudions la répartition des intervalles de tolérance.

$$\text{IT de A} = \text{IT de B} + \text{IT de X}$$

$$0.5 = 0.2 + ?$$

La répartition des intervalles de tolérance est facile, IT de X = 0.3. Le calcul est semblable à l'exemple # 1, section 9.3.a.

$$A_{\max} = B_{\max} - X_{\min}$$

$$X_{\min} = B_{\max} - A_{\max}$$

$$= 30.1 - 12.5 = 17.6 \text{ mm}$$

$$\text{Par conséquent, } X_{\max} = X_{\min} + \text{IT de X} = 17.6 + 0.3 = 17.9 \text{ mm}$$

Solution X =  $17^{+0.3}_{-0.1}$ , cote de fabrication à inclure à la phase 30 de la précédente gamme d'usinage.

#### 10.6.b Gamme d'usinage sur un centre d'usinage avec options

La figure 10.9 schématise la même pièce à usiner installée sur un centre d'usinage qui possède:

- une table conventionnelle avec trois axes de déplacement (Z,X,Y)
- une broche verticale avec changement d'outils automatique (voir figure 7.37).
- une option de quatrième axe, installée sur la table, qui peut faire pivoter la pièce autour de cet axe A. Cela permet aux outils d'accéder à la pièce par le dessus et latéralement.

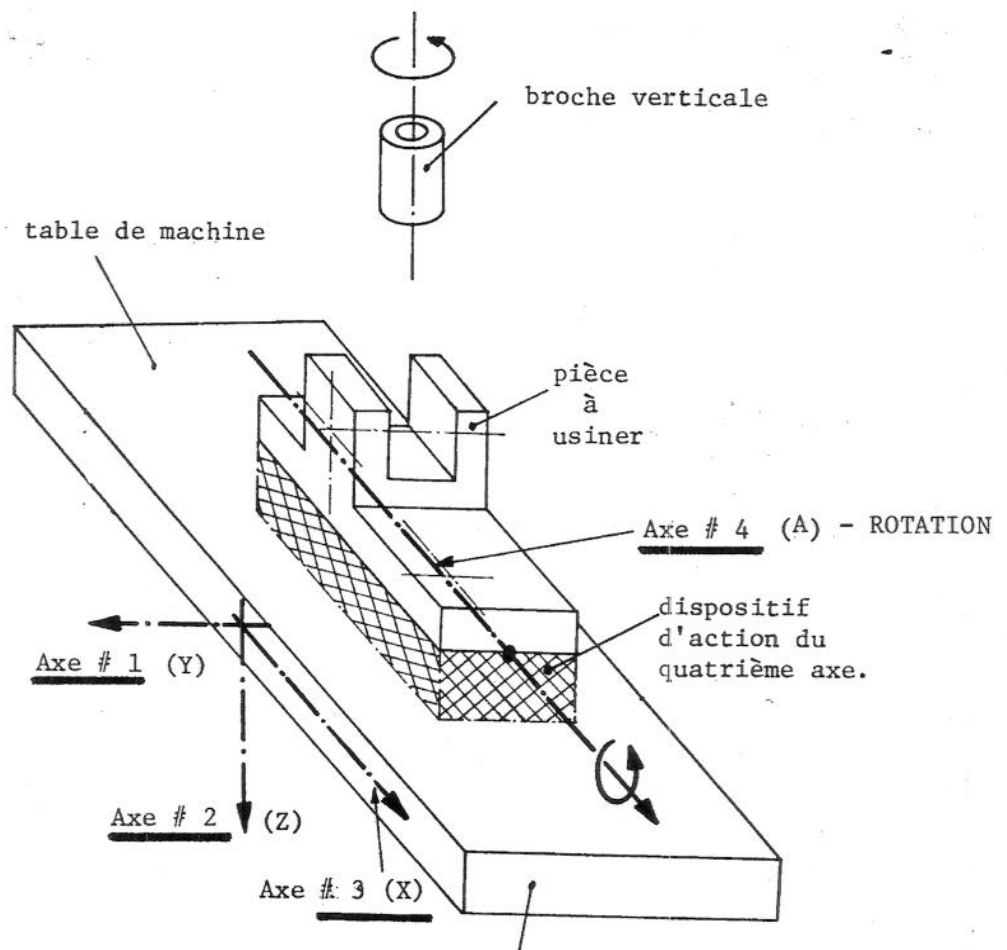


Figure 10.9: La pièce est installée sur un centre d'usinage à broche verticale avec option d'un quatrième axe.

| PH.      | M.O. | DESCRIPTION   | CROQUIS   | T.C. |
|----------|------|---|---|------|
| 10       | F.V. | <p><u>FRAISEUSE VERTICALE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ebauche, demi-finition et finition de la surface de départ A.</li> <li>- <u>Repérage isostatique</u><br/>Appui plan sur K<br/>Appui ligne sur B<br/>Butée axiale</li> <li>- Le serrage est opposé aux appuis 4 et 5</li> <li>- <u>Outil</u>: Fraise à surfacer avec outils rapportés en acier rapide.</li> </ul> |   | non  |
| 20<br>22 | C.U. | <p><u>CENTRE D'USINAGE</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ebauche de D</li> <li>- <u>Repérage isostatique</u><br/>Appui plan en A<br/>Appui ligne en B<br/>Butée en H</li> <li>- <u>Outil</u>: Foret à centrer<br/>Forets <math>\phi 7</math> et <math>14</math> mm.</li> </ul>   | <p>La pièce pivote de 90 degrés autour du quatrième axe montré à la figure 10.9 (axe A).</p>                                  | non  |
| 24       |      | <p><u>Usinages</u><br/>Ebauche, demi-finition et finition de la rainure R.</p> <p>Même repérage isostatique</p> <p><u>Outils</u> - Deux fraises 2 tailles, d'ébauche et de finition.</p>  | <p>Remarque: Ici aussi, un transfert de cotes est nécessaire pour calculer la cote X, voir la fin de la gamme précédente.</p> | oui  |



| GAMME D'USINAGE |      |   | Feuille 2/2  |      |
|-----------------|------|---|--|------|
| PH.             | M.O. | DESCRIPTION   | CROQUIS  | T.C. |
| 26              | C.U. | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Centre d'usinage (suite)</li> <li>- <u>Usinage</u><br/>Trou T et lamage L</li> <li>- Même repérage isostatique et serrage</li> <li>- <u>Outils</u><br/>Foret à centrer<br/>Forets <math>\phi</math> 6 et 9.7 mm<br/>Alésoir <math>\phi</math> 10 H8<br/>Outil à lamer <math>\phi</math> 16 avec pilote <math>\phi</math> 10</li> </ul> | <p>La pièce est repivotée de 90 degrés pour retrouver l'orientation de la sous-phase 22.</p> | non  |
| 28              |      | <u>Usinages</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Demi-finition de l'alésage D</li> <li>- Mêmes repérage isostatique et serrage</li> <li>- <u>Outils</u><br/>Grain d'alésage <math>\phi</math> 15.7 mm<br/>Alésoir <math>\phi</math> 16 H7</li> </ul>  |  | non  |
| 30              |      | EBAVURAGE   |  |      |
| 40              |      | CONTROLE  |  |      |
|                 |      |   |  |      |

COOP ETS

N° local: 131874



410001318743

GPA-210 NOTES DE COURS

REG: 21.35\$  
COOP: 18.50\$